Luhmann/Müller (Hrsg.)

Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik

Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006

Wichmann

Luhmann/Müller (Hrsg.)
Photogrammetrie
Laserscanning
Optische 3D-Messtechnik
Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006

Thomas Luhmann/Christina Müller (Hrsg.)

Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik

Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006

Herbert Wichmann Verlag • Heidelberg

Zum Titelbild

Die Abbildungen zeigen 3D-Scandaten des IMAGER 5003 der Zoller+Fröhlich GmbH, aufgenommen auf dem Marktplatz von Wangen im Allgäu. Vermessene Gebäude sind das historische Wangener Rathaus, die St. Martins Kirche sowie das Hinderofenhaus, welche den Marktplatz umgeben.
Bild 1 (links oben) ist eine abgewickelte Intensitätsdarstellung eines 360°-Scans, die eine visuelle Identifikation und Extraktion von Objekten ermöglicht. Basierend auf Intensitäts- und Entfernungsdaten des Laserscanners, kombiniert mit Farbfotos, lässt sich anschließend eine 3D-Punktwolke in Farbe erstellen (Bild 2, rechts oben). Eine berechnete Orthogonalansicht (Orthophoto) der Ansicht, inklusive Maßstab, ist in Bild 3 (links unten) dargestellt. Bild 4 (rechts unten) zeigt detailliert die farbige Punktwolke der Rathausfassade.

Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden von den Autoren nach bestem Wissen erstellt und von ihnen und dem Verlag mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht völlig auszuschließen. Daher erfolgen die Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie des Verlags oder der Autoren. Sie übernehmen deshalb keinerlei Verantwortung und Haftung für etwa vorhandene inhaltliche Unrichtigkeiten. Ebenfalls erfolgt die Verwendung der CD unter Ausschluss jeglicher Haftung und Garantie. Insbesondere wird jegliche Haftung für Schäden, die aufgrund der Benutzung der CD entstehen, ausgeschlossen.

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

ISBN 3-87907-436-4

© 2006 Herbert Wichmann Verlag
Druck: J. P. Himmer GmbH & Co. KG, Augsburg
Printed in Germany

Vorwort

Mit den zum fünften Mal ausgerichteten Oldenburger 3D-Tagen wurde auch 2006 wieder ein wichtiges Forum für Fachleute aus den Gebieten der Photogrammetrie, des Laserscannings und der optischen 3D-Messtechnik geboten. Die Resonanz hat sich gegenüber dem Vorjahr weiter erhöht, sodass sich in diesem Jahr ca. 230 Experten und 27 Firmenaussteller an der Veranstaltung beteiligt haben. Insgesamt 47 Fachbeiträge sowie eine Reihe von Produktdemonstrationen zeigen die Aktualität des Themengebietes und das Interesse von Autoren und Zuhörern am Workshop.

Besonderes Merkmal der Oldenburger 3D-Tage ist die Mischung von wissenschaftlichen Beiträgen aus aktueller Forschung mit anwendungsorientierten Berichten und Produktinformationen. Darüber hinaus sind sie eine der wenigen Veranstaltungen, in denen die Bereiche des Laserscannings mit denen der industriellen optischen 3D-Messtechnik und der Nahbereichsphotogrammetrie zusammengeführt werden. Alle genannten Technologien erzeugen heute präzise 3D-Messdaten in kurzer Zeit und hoher Datenmenge, wobei bildgebende Sensoren eine entscheidende Rolle spielen. Die Kombination unterschiedlicher Sensorsysteme (Laser, Streifenlicht, Kameras) birgt ein großes Potenzial zukünftiger Anwendungen, wirft aber auch noch etliche wissenschaftliche und technische Fragen auf.

Der fachliche Teil der Eröffnungsveranstaltung wurde in diesem Jahr durch einen Übersichtsvortrag von Harald Schlemmer, TU Darmstadt, zu n-dimensionalen Aspekten der Geodäsie und Geoinformation gestaltet. Schon im Vorjahr wurde mit dem Schwerpunktthema Dynamische Prozesse die Erfassung von Veränderungen und Bewegungen angesprochen. Zeit als vierte Dimension gewinnt zunehmend an Bedeutung, insbesondere auch für optische 3D-Messtechnik.

Das Vortragsprogramm bestand aus den Themenblöcken Photogrammetrie, Laserscanning, Kalibrierung, Algorithmen, optischen Messsystemen sowie Anwendungen. Ein spezielles Herstellerforum konnte zur Präsentation von Produkten und Systemen genutzt werden.

Für die erfolgreiche Durchführung des Workshops und der Realisierung dieses Tagungsbandes sei allen Beteiligten gedankt. Ein besonderer Dank geht an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für ihren besonderen Einsatz. Allen Autoren und Teilnehmern sei ebenfalls für ihr Engagement gedankt.

Auch 2007 werden die Oldenburger 3D-Tage wieder stattfinden.

Oldenburg, im Februar 2006 *Thomas Luhmann und Christina Müller*

Inhaltsverzeichnis

Einführung in die Thematik 1

Schlemmer, H.:
Geodäsie und Geoinformation – n-dimensional? 2

Photogrammetrie 9

Raguse, K. und Luhmann, T.:
Einsatz der dynamischen Photogrammetrie bei Fußgängerschutzversuchen in der PKW-Entwicklung 10

Jahn, I.:
Blick in die Sterne – Einsatz des Photogrammetriesystems V-STARS in der Luft- und Raumfahrtindustrie 18

Wolf, B.-M.:
Photogrammetrische Bestimmung von Bohrungen für industrielle Anwendungen 26

Rieke-Zapp, D. H.:
Wenn's etwas mehr sein darf – Verschieben der Hauptpunktlage für eine optimale Stereoabdeckung 32

Lange, J., Benning, W. und Peters, J.:
Photogrammetrie zur Deformations- und Rissanalyse bei textilbewehrten Betonbauteilen – Anwendung und Auswerteverfahren 40

Scherer, M.:
Phototachymetrie – eine Methode zur Bauwerksmodellierung 46

Sahrhage, V., Riede, R. und Luhmann, T.:
Optische 3D-Navigation von Sensoren 54

Optische 3D-Messverfahren 63

Klattenhoff, R., Bothe, T., Gesierich, A., Li, W., Von Kopylow, C. und Jüptner, W.:
Flexibles Streifenreflexionssystem zur topologischen Prüfung der Flugzeugaußenhaut und anderer glänzender Oberflächen 64

Niehus, J., Lorenz, T., Lehmann, P., Bobey, K. und Brekerbohm, L.:
3D-Topographieerfassung mittels Weißlichtinterferometrie 76

Gesierich, A., Bothe, T. und Li, W.:
Entwicklung des Streifenprojektionssystems „3D-Kamera“ – von der Idee über das Produkt zum industriellen Einsatz 86

Lahmann, H.-W. und Stöckmann, M.:
Messtechnische Bewertung von Schleifwerkzeugoberflächen auf Basis der konfokalen Mikroskopie 96

Kalibrierung 105

Peipe, J. und Tecklenburg, W.:
Vergleich von Softwaretools zur Kamerakalibrierung 106

Hastedt, H., Luhmann, T. und Tecklenburg, W.:
Zur Nutzung von RGB-Farbkanälen für die hochgenaue 3D-Punktbestimmung 112

Schwalbe, E. und Maas, H.-G.:
Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Aberration bei der Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmesystemen 122

Schulte, M., Bothe, T., Li, W., Gesierich, A., Von Kopylow, C. und Jüptner, W.:
Hochauflösende Sichtstrahlkalibrierung für optisch abbildende Systeme am Beispiel Streifenprojektion 130

Algorithmen 139

Ehrich, F. und Tenzer, A.:
Speicherung von zeitkontinuierlichen Sensordaten (Laserscanner) am Beispiel Fahrerleistungsdatenbank 140

Reiterer, A.:
Der Einsatz von Techniken aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz bei bildgebenden Sensorsystemen 148

Scheller, S. und Schneider, D.:
Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken 156

Laserscanning – Genauigkeitsuntersuchungen 165

Zámečníková, M. und Weber, T.:
Genauigkeitsüberprüfung terrestrischer Laserscanner mittels Referenzkörper 166

Neitzel, F.:
Gemeinsame Bestimmung von Ziel-, Kippachsenfehler und Exzentrizität der Zielachse am Beispiel des Laserscanners Zoller + Fröhlich Imager 5003 174

Kersten, T., Sternberg, H. und Stiemer, E.:
Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus – Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich 184

Semmler, A.:
Qualitätsstandards in der Architekturvermessung – Anwendung auf das 3D-Laserscanning..... 196

Laserscanning – Modellierung 205

Beder, C. und Förstner, W.:
Direkte Bestimmung von Zylindern aus 3D-Punkten ohne Nutzung von Oberflächennormalen 206

Bienert, A.:
Glättung von aus Laserscannerpunktwolken extrahierten Profilen..... 214

Rohrberg, K.:
Reale 3D-Modelle aus 4D-Punktwolken..... 222

Laserscanning – Anwendungsbeispiele..... 231

Becker, W., Dietrich, R. und Leopold, M.:
3D-Aufbau und Nutzung virtueller Welten im Anlagenbau..... 232

Soumagne, J. und Heister, H.:
Konzept für eine As-Built-Aufnahme von Schiffsrümpfen..... 238

Becker, R.:
Laserscanning und Photogrammetrie – die Vielfalt der Auswertemöglichkeiten 246

Kersten, T., Biebermann, M. und Schneider, M.:
3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning 254

Prümm, O., Pospiš, M. und Doghaili, M.:
Orthoprojektionen und Abwicklungen höherer Komplexität – Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis 264

Fricke, L.:
Vergleich von Anforderungen an 3D-Stadt- und Gebäudemodelle 272

Aschoff, T., Holderied, M. W. und Spiecker, H.:
Terrestrische Laserscanner zur Untersuchung von Wäldern als Jagdlebensräume für Fledermäuse 280

Ratke, K.:
Erfassung, Analyse und Modellierung des Futuro-Hauses von Matti Suuronen 288

Broser, J.-M.:
Vom 3D-Scan zum Restaurierungsplan: Streifenlicht- und Laserscanner – eine sinnvolle Ergänzung 300

Mechelke, K., Sternberg, H. und Kersten, T.:
Bauwerksuntersuchungen durch terrestrisches Laserscanning mit dem Mensi GS100 308

Obertreiber, N. und Stein, V.:
Dokumentation und Visualisierung einer Tempelanlage auf Basis von Laserscanning und Photogrammetrie 316

Herstellerforum 325

Adolf, S. und Barnes, M.:
3D-Nahbereichscanning für die Denkmalpflege 326

Fluch, M.:
Terrestrisches Laserscanning – Messung und Auswertung im Alltag 332

Illmann, U. und Linke, J.:
Der neue 3D-Laserscanner CPW 8000 basierend auf der neuen Pulsed-Wave-Technologie von CALLIDUS precision systems 340

Abmayr, T., Härtl, F., Breitner, M., Ehm, M. und Fröhlich, C.:
Multimodale Sensorfusion auf Basis des Imager 5003 346

Ullrich, A. und Studnicka, N.:
Entwicklungen in der Zusammenführung boden- und luftgestützter Laserscanner- und Kameradaten 356

Autorenverzeichnis..... 367

Einführung in die Thematik

Geodäsie und Geoinformation – n-dimensional?

Harald SCHLEMMER

Zusammenfassung

Der Beitrag behandelt die Frage nach notwendigen oder erforderlichen Mess- und Auswertestrategien angesichts neuer geodätischer Sensoren. Moderne Sensoren liefern automatisch in sehr kurzer Zeit neben einer großen Anzahl von Koordinatentripel weitere, zusätzliche Informationen. Die Geodäsie muss parallel dazu neue Auswertestrategien und -verfahren zur automatisierten Auswertung entwickeln.

1 Dimensionen

Von dem uns umgebenden Raum nehmen wir nur einen kleinen Ausschnitt wahr; wir können wenig über seine globale Geometrie sagen. Ebenso wie die Erdoberfläche in unserer Nähe als Ebene erscheint und doch in Wahrheit eine unbegrenzte, aber endliche Fläche ist, könnte auch unser Raum im Großen ganz anders als der euklidische Raum aussehen, auch wenn in unserer Nähe die euklidische Geometrie im Rahmen der Messgenauigkeit Gültigkeit hat. Unsere Erfahrungen gehen von einer dreidimensionalen Welt ($n = 3$) aus. Die Riemannsche Geometrie dagegen stellt die mathematischen Modelle für Räume mit beliebiger Dimensionszahl zur Verfügung, also $n = \infty$ (G. B. Riemann war Schüler von C. F. Gauß in Göttingen). Eine Welt mit mehr als drei Dimensionen können wir uns nur schwer vorstellen. Ein Beispiel ist in der Abbildung 1 gegeben,

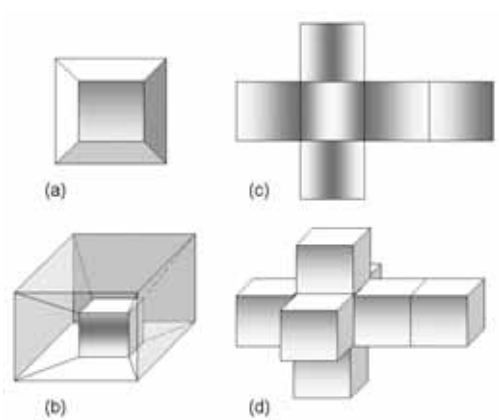


Abb. 1: 3D- und 4D-Würfel

Wenn wir einen dreidimensionalen Würfel im Aufriss spiegeln, sehen wir zwei Quadrate, deren je vier Eckpunkte durch vier Strecken verbunden sind (a). Wir können uns keinen

vierdimensionalen Würfel vorstellen, sein Aufriss im Spiegel jedoch würde die dreidimensionale Projektion (b) sein, die wir uns vorstellen können. Sie bestünde aus zwei Würfeln, die durch zwölf Flächen verbunden sind, von denen jede von einer Kante des inneren Würfels ausgeht und an einer Kante des äußeren Würfels endet. Wenn wir die eindimensionalen Grenzen eines zweidimensionalen Quadrats abwickeln, entsteht eine Strecke mit vier gleichen Abschnitten. Wenn wir die zweidimensionalen Grenzen eines dreidimensionalen Würfels abwickeln, entsteht ein Kreuz (c) aus sechs gleichen Quadraten. Entsprechend würden die dreidimensionalen Grenzen eines (nicht vorstellbaren) vierdimensionalen „Würfels" abgewickelt wie das Gebilde (d) aussehen, das aus acht gleichen Würfeln besteht.

Neueste Überlegungen zur Quantenphysik im Zusammenhang mit der Super-String-Theorie zum Aufbau von atomaren Elementarteilchen gehen von einer 9-, 10- oder 11-Dimensionalität des Raumes aus. Die 11-Dimensionalität des Raumes in der Super-String-Theorie kann nach dieser Theorie deshalb nicht wahrgenommen werden, weil – bis auf die drei uns bekannten Raumdimensionen – alle anderen Dimensionen zusammengerollt und kleiner als die postulierte Quantelung der Länge (Plancklänge = 10^{-33}cm) sind.

Geodäten hatten sich schon immer mit drei Dimensionen des Raums zu beschäftigen, pflegen doch technische Objekte und die Figur der Erde im Allgemeinen dreidimensional zu sein. Wie man vielen Bildern von M. C. ESCHER entnehmen kann, wird für den Geodäten – und nicht nur für ihn – die Frage des Erdschwerefeldes eine zusätzliche, wichtige Rolle spielen. H. MORITZ hat dies einmal trefflich formuliert: „Die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins ist nichts als eine ziemlich triviale Übungsaufgabe in der n-dimensionalen Geometrie für den einfachen Fall n = 4". Dass der Riemannsche Krümmungstensor in diesem Übungsbeispiel das Erdschwerefeld ist, das verhindert, dass wir durch die Erdrotation in den Weltraum geschleudert werden, hat freilich erst Einstein erkannt und dass der einfache Fall n = 4 Raum und Zeit bedeutet, ist nicht ganz so trivial, doch Ingenieure besitzen gewisse Grundsätze, die ihnen bei der Lösung ihrer praktischen Probleme hilfreich sind. So sind sie der Auffassung, dass sich echte Handlungsspielräume erst in der Verbindung von Nützlichem mit Grundsätzlichem ergeben, also in der Anwendung der Gesetze der Naturwissenschaften auf technische Fragestellungen. Dabei haben sie die Neigung, komplexe Fragestellungen durch intelligente Vereinfachungen zu lösen, also versuchen sie, die Welt in vereinfachten Modellen abzubilden, das Wesentliche zu behandeln und Unwichtiges zu ignorieren, um so Handlungsfähigkeit zu erreichen.

Wenden wir diese Grundsätze auf die Fragestellung der n-Dimensionalität des Raumes an. Wollen wir Geodäten hier Handlungsspielräume erlangen, müssen wir die Anzahl der Raumdimensionen beschränken und in einem vereinfachten Modell auf endlich viele Dimensionen setzen. Über lange Zeit „vereinfachte" der Geodät in der Fragestellung der Anzahl der Dimensionen, indem er in einer 2½-dimensionalen Welt gemessen und ausgewertet hat. Solche Vereinfachungen der Natur in den Modellen des Ingenieurs müssen allerdings ständig überprüft werden, denn sie tragen große Risiken in sich, unter Umständen sogar für die Zukunftsfähigkeit eines ganzen Berufsstandes.

Eine Dimension ist eine unabhängige Achse oder Richtung im Raum. Der uns umgebende und vertraute Raum besitzt vier Dimensionen, neben den drei Richtungen zusätzlich die Raumzeit als Zeitachse Vergangenheit – Zukunft. Der Ortsvektor der Raumzeit lautet somit:

$$x = (x_1, x_2, x_3, c \cdot t) \tag{1}$$

Nimmt man also die Zeit mit ins Kalkül der Geodäsie, wird man unmittelbar auf den Begriff „Kinematik“ stoßen. In HÜTTE ist Kinematik definiert: „Gegenstand der Kinematik ist die Beschreibung der Lagen und Bewegungen von Punkten und Körpern mit Mitteln der analytischen Geometrie.“ Der Begriff „Kinematische Vermessung“ wird schon längere Zeit bei der Messung und Auswertung von Deformationsmessungen verwendet, etwa wenn die einzelnen Beobachtungsepochen durch kinematische Auswertemodelle miteinander verknüpft werden, um durchschnittliche Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen der Deformation abzuleiten. Dies ist jedoch keine Kinematik im Sinne der Definition, sondern es handelt sich um die kinematische Interpretation statischer Messungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten ausgeführt wurden und unterschiedliche Zustände repräsentieren (quasi-kinematisch). Die „echte“ kinematische Messtechnik setzt bereits bei den Beobachtungen an. Ziel soll sein, eine Bewegung durch geodätische Beobachtung so zu erfassen, dass die Bewegung insgesamt und für jeden Zeitpunkt innerhalb des Zeitintervalls der Beobachtung hinreichend genau beschrieben werden kann. Die Beobachtung erfolgt also im Gegensatz zu klassischen Deformationsmessung in einem zusammenhängenden Messzeitraum, wobei der Bewegungsvorgang nicht aus messtechnischen Gründen unterbrochen wird.

2 Instrumentarium und Auswerteverfahren

Moderne, automatisierte Sensorsysteme aus dem Bereich der Geodäsie besitzen – wenn auch primär nicht aus Gründen der Kinematik – einige besondere Eigenschaften. Sie erlauben hohe Messfrequenzen, besitzen eine automatische Zieleinrichtung, eine automatische Datenerfassung und -verarbeitung und ermöglichen – zumindest zum Teil – eine zeitliche Synchronisierung der Messdaten. Diese Eigenschaften wurden in die Instrumente hineinkonstruiert, um die klassischen Vermessungsaufgaben einfacher und schneller erledigen zu können.

Abb. 2: Laserscanner

Damit lassen sich jedoch auch zusätzliche Vermessungsaufgaben ausführen, die den geodätischen Sensoren bisher wegen ihrer statischen Auslegung nicht zugänglich waren. Etwa wenn Objekte sich schnell bewegen oder Objektdeformationen mit hoher Geschwindigkeit

ablaufen, die durch visuelle Beobachtungen nicht mehr hinreichend genau erfassbar sind oder Bewegungen vieler Objektpunkte gleichzeitig angegeben werden müssen, um beispielsweise die Lage des Objekts im Raum oder den Verformungszustand eines Objekts zu verschiedenen Zeitpunkten exakt angeben zu können.

Betrachtet man vereinfachend nur die Messfrequenz als Indikator und trägt diesen Parameter in das von der klassischen Geodäsie behandelte Zeitspektrum ein, so erkennt man, dass sich der Anwendungsbereich dieser Sensoren gegenüber den klassischen Aufgabenbereichen der Geodäsie erheblich erweitert.

Bedingt durch die hohe Messfrequenz der Polarscanner (einige 10.00 Messungen pro Sekunde) muss die Philosophie der herkömmlichen geodätischen Aufnahmetechnik neu überdacht werden. Bisher wird das (komplexe) Aufnahmeobjekt durch den Geodäten mithilfe repräsentativer Einzelpunkte idealisiert. Diese wenigen Einzelpunkte werden messtechnisch erfasst und bilden die Grundlage des Objektmodells für die Auswertung. Ein Polarscanner liefert in sehr kurzer Zeitfolge dreidimensionale Polarkoordinaten einer Objektoberfläche. Das wesentliche Merkmal des Laserscans ist zunächst die schnelle dreidimensionale Erfassung des Objekts mit hoher Punktdichte. Zusätzlich zur geometrischen Information kann die Intensität (i) des reflektierten Lasersignals erfasst werden. Werden die gemessenen Daten (x, y, z, i) rasterförmig gespeichert, entsteht ein Abstandsbild und ein Intensitätsbild. Ein Beispiel für eine solche Punktwolke ist in der Abbildung 3 gezeigt. Das „Bild“ besteht aus mehreren Millionen Einzelpunkten. Die Distanz- und Intensitätsinformationen sind zur Visualisierung der Punktwolke schon verarbeitet.

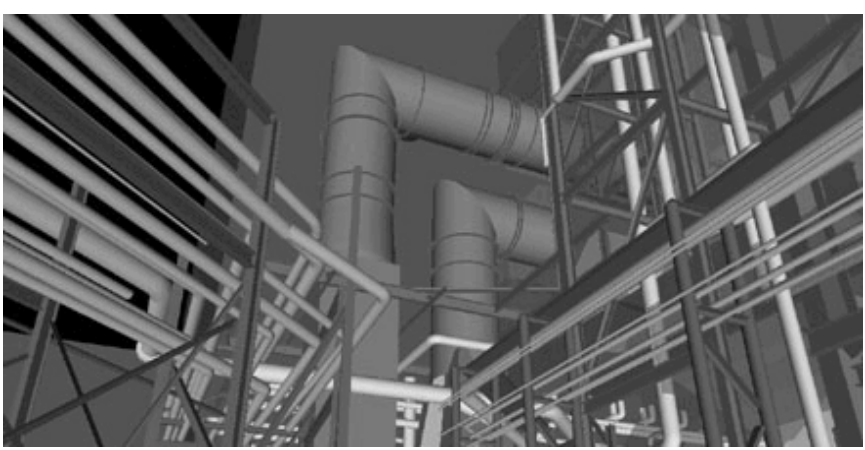


Abb. 3: Punktwolke eines Laserscans

Diese unstrukturierte Punktwolke aus einigen Millionen Objektkoordinaten muss nun jedoch einer aufwändigen Weiterverarbeitung unterzogen werden. Dies geschieht zurzeit meist mit großem manuellen Aufwand. Anzustreben sind automatische Auswertealgorithmen, die aus der Punktwolke geometrische Elemente wie Ebenen, Kugeln, Zylinder usw. und Attribute oder sogar die Semantik bestimmen bzw. bestmöglich approximieren.

3 Aufgabenstellungen für die Zukunft

Objekte der realen Welt werden in dreidimensionalen CAD-Systemen durch geometrische Primitive repräsentiert. Die Primitiven müssen das reale Objekt in dem für den Erfassungszweck ausreichenden Maße modellieren. Die Parametrisierung der Primitiven im Raum setzt sich aus Lage- und Formparameter zusammen. Die Bestimmung der Lageparameter war und ist eine der Grundaufgaben der Geodäsie. Formparameter werden durch lineare oder nichtlineare Ansätze der Ausgleichungsrechnung automatisch gefunden.

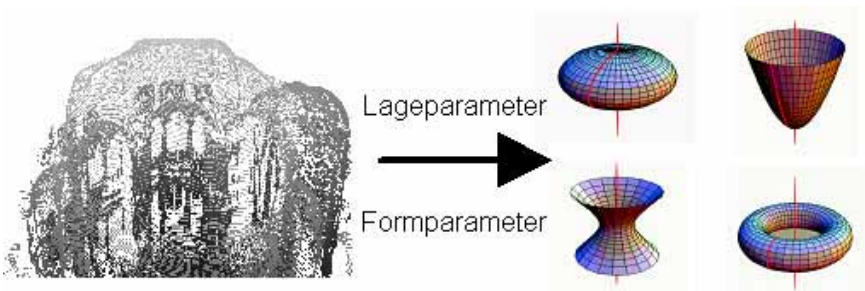


Abb. 4: Automatische Extrahierung der Lage- und Formparameter

Physiker, Neurobiologen, Wahrnehmungspsychologen und Spezialisten des Computersehens haben dem menschlichen Sehen in den letzten Jahrzehnten viele seiner Geheimnisse abgetrotzt. Gleichwohl sind wir noch nicht in der Lage, den Vorgang des dreidimensionalen Sehens mathematisch nachzubilden. Unter anderem wurde eine These entwickelt, nach der wir unsere visuellen 3D-Welten aus den zweidimensionalen (und damit mehrdeutigen) Bildern auf der Netzhaut mithilfe visueller Regeln gestalten (visuelle Intelligenz). Bisher wurden einige hundert solcher Regeln identifiziert. Sie könnten Grundlage sein für eine effektive, unserem Sehen angepasste 3D-Modellierung von Messergebnissen geodätischer Sensoren.

Bevor wir jedoch die „visuelle Intelligenz“ durch Algorithmen nachvollziehen können, müssen wir praktikable Lösungen einsetzen. Zur automatischen Verknüpfung und Orientierung von Punktwolken mehrere Scannerstandpunkte zu einem einheitlichen Mess- und Referenzsystem können wir Methoden der Photogrammetrie mit der automatischen Identifikation identischer Objekte einsetzen. Die automatische Extraktion beliebiger Geometrien aus der Punktwolke muss fortentwickelt werden. Es genügt nicht – wie heute allgemein realisiert – nur die Regelgeometrien auszuwerten.

Doch auch an die mögliche Weiterverwendung der originären Daten (Punktwolke) sollte gedacht werden. Viele Anwender nutzen diese Punktwolke zur Dokumentation oder auch zu Planungszwecken. Wir müssen diesen Kunden den Originaldatensatz in geeigneter Aufbereitung zur Weiterverarbeitung in der gewohnten CAD-Umgebung zur Verfügung stellen. Zur Erweiterung des Einsatzspektrums der Messergebnisse geodätischer Sensoren müssen semantische Daten in den hybriden Voxel-Vektor-Raum eingefügt werden, womit eine vielfältige Verwendungsmöglichkeit der Daten in den verschiedensten Informationssystemen gegeben sein wird.

Um die Frage im Titel dieses Beitrages beantworten zu können, müssen wir die Summenprobe zu den behandelten Dimensionen machen: Geodäten müssen die drei Raumdimensionen, die Zeit und als weitere Dimension der aufgemessenen Dinge die Attributierung der Objekte in ihre Mess- und Auswertestrategien einbeziehen. Damit ergeben sich „fünf Dimensionen“, was angesichts der von der Quantenphysik geforderten 11 Dimensionen oder gar der beliebigen Anzahl von Dimensionen in der Riemannschen Geometrie noch handhabbar scheint, und die Handlungsfähigkeit des Geodäten im Sinne der Ingenieurdisziplinen sicherstellt.

Literatur

Drixler, E. (1993): *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C

Hoffman, D. D. (1998): *Visuelle Intelligenz*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München

Mönicke, H.-J. (1996): *Kinematik im Vermessungswesen*. In: Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung. Schriftenreihe DVW, Bd. 22, Wittwer Verlag, Stuttgart

Moritz, H. (2000): *Was ist Geodäsie*? In: Festschrift zum 70. Geburtstag von Wolfgang Torge

Pelzer, H. (1987): *Deformationsuntersuchungen auf der Basis kinematischer Bewegungsmodelle*. In: AVN, Wichmann Verlag, Karlsruhe

Schlemmer, H. (2002): *Ingenieurgeodäsie für den einfachen Fall n = 4*. In: Am Puls von Zeit und Raum, Festschrift 50 Jahre Deutsche Geodätische Kommission. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München

Photogrammetrie

Einsatz der dynamischen Photogrammetrie bei Fußgängerschutzversuchen in der PKW-Entwicklung

Karsten RAGUSE und Thomas LUHMANN

Zusammenfassung

Bei der Fahrzeugentwicklung wird neben der Sicherheit der Fahrzeuginsassen in zunehmendem Maße auch die Sicherheit der potenziellen Unfallopfer bei Unfällen mit Fußgängern berücksichtigt. Für die Durchführung dieser so genannten Fußgängerschutzversuche in der PKW-Entwicklung gilt seit Oktober 2005 eine neue EU-Richtlinie. In ihr sind neben den Anforderungen an zulässige Beschleunigungskräfte und Biegewinkel der Testkörper auch messtechnische Anforderungen an die Durchführung der Versuche spezifiziert. Im vorliegenden Artikel wird ein Verfahren zur photogrammetrischen Auswertung der Versuche mit einem solchen Testkörper, in diesem Fall einem Beinimpaktor, vorgestellt. Über dieses Verfahren kann die Einhaltung der messtechnischen Anforderungen zuverlässig überprüft werden. Die Versuche werden mit einem Einkamera-Messsystem, dass aus einer digitalen Highspeed-Kamera mit einem Stereospiegelvorsatz besteht, aufgenommen. Die Eignung dieses Systems und der Auswerteablauf werden anhand praktischer Versuchsergebnisse demonstriert. Durch die vorgestellte Anwendung werden die Vorteile der dynamischen Photogrammetrie für den Einsatz im Bereich der Fahrzeugsicherheit deutlich herausgestellt. Das eingesetzte Verfahren ist einfach und mit geringem Zeitaufwand einsetzbar und kann die messtechnischen Anforderungen zuverlässig überprüfen.

1 Einleitung

Im Bereich der Sicherheitsversuche in der Fahrzeugentwicklung hat die dynamische Photogrammetrie in verschiedenen Bereichen Einzug gehalten. So werden beispielsweise die Fahrzeugkinematik und die Dummybewegung bei Crashversuchen photogrammetrisch vermessen (RAGUSE et al. 2004, MCCLENATHAN et al. 2005). Aber auch bei anderen Sicherheitsversuchen wird die dynamische Photogrammetrie als Messsystem zunehmend als Ergänzung zu der elektrischen Messtechnik, wie z. B. Beschleunigungs- oder Drehratensensoren, eingesetzt. Manche Messaufgaben können nur durch die Kombination aus elektrischer und optischer Messtechnik bearbeitet und gelöst werden. Durch diese Sensorfusion ergeben sich somit völlig neue Anwendungsgebiete. Neben bestimmten Messaufgaben für die Entwicklung gibt es ein anderes immer wichtiger werdendes Anwendungsgebiet, die Überprüfung der Versuchsdurchführung auf Einhaltung von Gesetzesvorschriften und Richtlinien. Dabei müssen spezielle messtechnische Anforderungen überprüft und dokumentiert werden. Aufgrund der Vorteile der optischen Messtechnik durch berührungslose Messung und automatisierte Auswertung kommt sie bei diesen Anwendungen verstärkt zum Einsatz.

Im Rahmen der Fahrzeugentwicklung wird neben der Sicherheit der Fahrzeuginsassen in zunehmendem Maße auch die Sicherheit von Fußgängern berücksichtigt (SCHULTE 2003,

INSEL & STEIN 2003). Für die Durchführung dieser Fußgängerschutzversuche in der PKW-Entwicklung gilt seit Oktober 2005 die EU-Richtlinie 2003/102/EG. In ihr werden spezielle messtechnische Anforderungen an die Durchführung von Fußgängerschutzversuchen spezifiziert. Ein Ziel dieser Richtlinie ist, die Vergleichbarkeit, Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der durchgeführten Versuche sicherzustellen. Diese EU-Richtlinie ist in zwei Phasen eingeteilt und spezifiziert die Anforderungen an die Durchführung von Sicherheitsversuchen mit verschiedenen Prüfkörpern (Impaktoren), die gegen die Front eines Fahrzeuges geschossen werden (vgl. Abb. 1). Die Phase 1 dieser EU-Richtlinie ist im Oktober 2005 in Kraft getreten, d. h. alle neu entwickelten Fahrzeuge, die in Europa auf den Markt kommen, müssen sich dieser Abnahmeprüfung stellen.

Im vorliegenden Artikel werden die messtechnischen Anforderungen für den Beinimpaktor aus Phase 1 der Richtlinie überprüft.

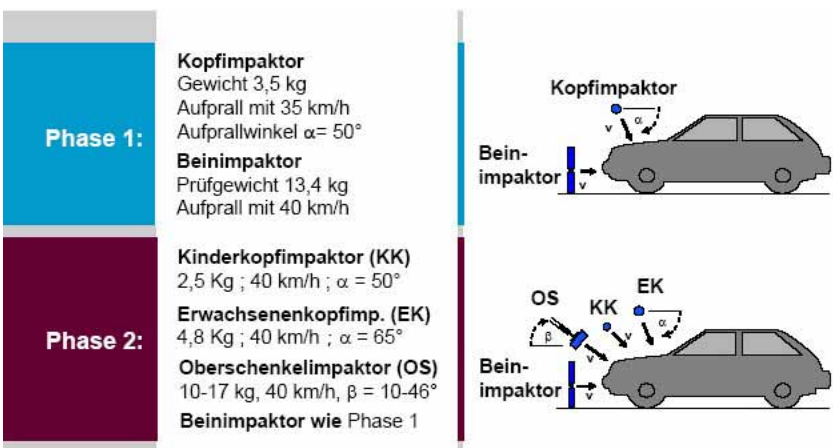


Abb. 1: Prüfumfang nach EU-Richtlinie 2003/102/EG (STRUTZ & SCHRIEVER 2005)

2 Messtechnische Anforderungen

In der EU-Richtlinie sind mehrere messtechnische Anforderungen an die Durchführung eines Fußgängerschutzversuches spezifiziert. Diese definieren die Orientierung des Beinimpaktors und die Beschreibung seiner Flugbahn zum Zeitpunkt des Auftreffens auf die Fahrzeugfront. Des Weiteren werden Anforderungen an die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Auftreffens und an die Trefferlage gestellt.

Die maximal zulässigen Abweichungen von den spezifizierten Sollwerten sind in Abbildung 2 visualisiert und im Folgenden zusammengefasst.

Zulässige Abweichungen der Orientierung des Beinimpaktors zum Auftreffzeitpunkt:

- 2° in der Lateral- und der Longitudinal-Ebene
- 5° um die vertikale Achse des Impaktors

Zulässige Abweichung der Flugbahn des Beinimpaktors zum Auftreffzeitpunkt:

- 2° in der Horizontal- und der Longitudinal-Ebene

Geschwindigkeit mit zulässiger Abweichung:

- 11,1 m/s ± 0,02 m/s

Zulässige Abweichung von der vorher festgelegten Trefferlage:

- 10 mm

Die Geschwindigkeit wie auch die Trefferlage werden über fest installierte Messsysteme am Prüfstand überwacht. Die Überprüfung der Winkel war in der Vergangenheit jedoch noch nicht ausreichend und zuverlässig realisiert. Für diese Anwendung wurde ein neues operationell einsetzbares, optisches Messsystem entwickelt.

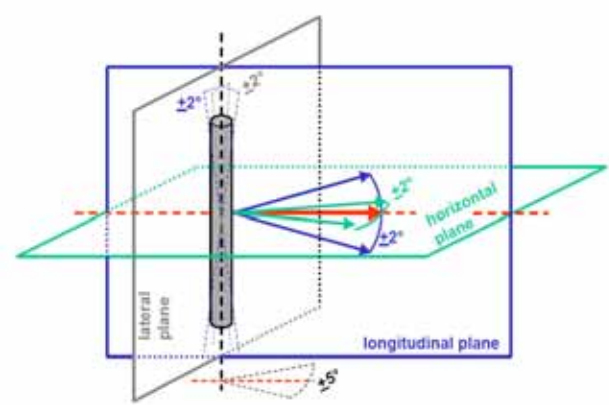


Abb. 2: Anforderungen an die Orientierung und die Flugbahn des Beinimpaktors zum Auftreffzeitpunkt (EU-RICHTLINIE 2003/102/EG, 2004)

Die messtechnischen Anforderungen sind durch zulässige Winkeltoleranzen in den verschiedenen Ebenen definiert. Über die Photogrammetrie werden jedoch nicht direkt Winkel, sondern nur Punkte gemessen, aus denen im Anschluss die Winkel abgeleitet werden müssen. Für diese Auswertungen wurden am Beinimpaktor spezielle, signalisierte Messmarken angebracht (vgl. Abb. 3). Der Beinimpaktor besteht aus zwei Stahlkernen, welche Ober- und Unterschenkel darstellen. Sie sind mit einem Kniegelenk verbunden. Die Umhüllung dieser Kerne besteht aus einer Schicht aus elastischem Schaum, die mit einer Neoprenhaut überzogen ist. Damit die Winkel während der gesamten Versuchsdauer zuverlässig bestimmt werden können, ist es erforderlich, dass die Punkte am Beinimpaktor fest miteinander verbunden sind, d. h. ihre Position zueinander während des gesamten Versuches starr ist. Aus diesem Grund konnten keine Punkte auf der Außenhaut des Impaktors genutzt werden, da sich die Haut und somit auch die angebrachten Punkte während des Versuches zueinander bewegen können. Die in Abbildung 3 gekennzeichneten fünf Zielmarken sind fest mit dem Stahlkern im Inneren des Impaktors verbunden. Die Stabilität der Marken zueinander wurde in verschiedenen Testversuchen überprüft und nachgewiesen.

Damit die zulässigen Winkeltoleranzen exakt bestimmt werden können, muss eine Messgenauigkeit erreicht werden, die etwa um den Faktor 5–10 besser ist als die zulässige Toleranz für die Winkel. Aus dieser Anforderung an die Winkelmessgenauigkeit und der Verteilung der Messmarken auf dem Impaktor lassen sich die geforderten Winkelgenauigkeiten über die Bogenformel in Punktmessgenauigkeiten umrechnen. Somit ergibt sich eine erforderliche Punktmessgenauigkeit von 1 mm in der Longitudinal-Ebene und 5 mm senkrecht zu dieser Ebene.

Speziell bei den Anbauten musste darauf geachtet werden, dass das in der EU-Richtlinie spezifizierte Gewicht für den Beinimpaktor nicht überschritten wird und dass das Flugverhalten des Beinimpaktors durch die Anbauten nicht beeinflusst wird.

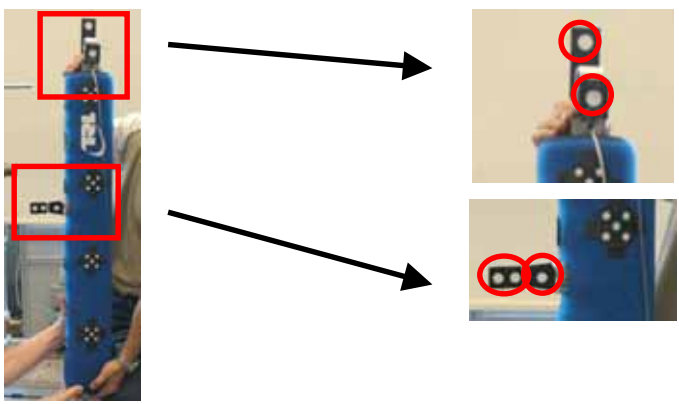


Abb. 3: Modifikationen am Beinimpaktor

3 Messsystem

Für diese Anwendung wird ein Einkamera-Messsystem, bestehend aus einer digitalen Highspeed-Kamera und einem davor montierten Stereospiegelvorsatz, genutzt (vgl. Abb. 4). Durch den Einsatz dieses Einkamera-Messsystems werden zwei mögliche Problempunkte eliminiert. Zum einen gibt es gerade bei hochdynamischen Anwendungen Probleme mit der Synchronität der eingesetzten Highspeed-Kameras. Für eine exakte Auswertung ist es essentiell wichtig, dass die Objektbewegung mit allen Kameras synchron erfasst wird. Dies ist bei dem Einsatz von zwei oder mehr Kameras nicht immer gewährleistet. Ein weiteres Problem ist die Orientierung mehrerer Kameras zueinander. Für diesen Auswerteschritt werden Passpunkte im Messvolumen benötigt. Da die Messungen in dieser Anwendung in einer Versuchshalle mit Werkstattumfeld durchgeführt werden, ist die Stabilität und Verfügbarkeit eines Passpunktfeldes nicht immer sichergestellt. Durch den Einsatz des Stereospiegelvorsatz-Messsystems werden diese beiden Problempunkte umgangen. Da bei dem System über eine Spiegeloptik zwei virtuelle Kameras simuliert werden (LUHMANN 2005), diese aber die gleiche Optik und den gleichen Sensor nutzen, sind die beiden aufgenommenen Sequenzen exakt synchron. Des Weiteren hat das System eine stabile relative Orientierung zwischen den beiden virtuellen Kameras. Diese wird in einer Vorabkalibrierung zusammen mit den Parametern der inneren Orientierung bestimmt (HASTEDT

et al. 2005). Das Messsystem kann also ohne Informationen aus dem Versuchsumfeld direkt eine hochgenaue dreidimensionale dynamische Messung durchführen. Die Ergebnisse der Messung werden im Koordinatensystem des Stereospiegelvorsatzes bestimmt.

Abb. 4: Stereospiegelvorsatz

Ein Nachteil des Messsystems liegt in der Einschränkung des nutzbaren Bildformates. Bei dem hier eingesetzten System kann nur die Hälfte der horizontalen Sensorfläche der digitalen Highspeed-Kamera für jede virtuelle Kamera genutzt werden. Des Weiteren ist die Aufnahmegeometrie durch die Spiegeloptik vorgeben und kann nicht beliebig variiert werden. Für diese Messaufgabe wurde der Stereospiegelvorsatz passend konstruiert, sodass die Nachteile nicht relevant sind.

4 Praktische Versuchsreihe

4.1 Versuchsaufbau

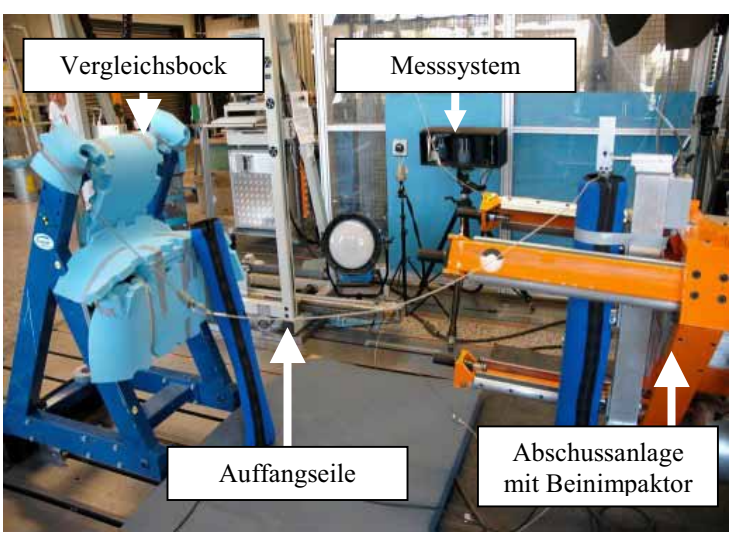


Abb. 5: Versuchsaufbau

Auf der rechten Seite von Abbildung 5 ist die Abschussanlage mit dem eingespannten Beinimpaktor dargestellt. Links ist der Vergleichsbock, auf den der Beinimpaktor geschossen wird. An Stelle des Vergleichsbocks ist bei regulären Versuchen das Fahrzeug positioniert. Im Hintergrund ist der Stereospiegelvorsatz zu sehen. Damit der Beinimpaktor nach dem Auftreffen nicht unkontrolliert durch den Raum fliegt, wird er nach dem Auftreffen durch Auffangseile kontrolliert abgebremst. Somit bleiben die angebrachten Marken auf den Adaptern am Beinimpaktor auch von Versuch zu Versuch stabil. Ohne die Auffangseile würden sich die Adapter am Impaktor sehr wahrscheinlich bei jedem Versuch verbiegen oder abbrechen und müssten nach jedem Versuch jeweils neu montiert und eingemessen werden, was einen enormen Mehraufwand bedeuten würde.

4.2 Messung und Auswertung

Es wurden mehrere Schussversuche mit dem Beinimpaktor auf der Anlage durchgeführt. Bei allen Versuchen wurden die Koordinaten der Messmarken auf dem Beinimpaktor vorab in einer statischen Vorvermessung photogrammetrisch ermittelt. Im Anschluss daran wurde der Impaktor eingespannt und gegen den Vergleichsbock geschossen. Die fünf starren Punkte auf dem Impaktor konnten über eine Dauer von etwa 40 ms bis zum Zeitpunkt des Auftreffens gemessen werden. Ein Bild der aufgenommenen Sequenz ist in Abbildung 6 dargestellt. Die gestrichelte Linie in der Mitte des Bildes visualisiert die Trennlinie zwischen den beiden Teilbildern der virtuellen Kameras. Die Auswertung der Bildsequenz erfolgt zunächst im Koordinatensystem des Stereospiegelvorsatzes. Dieses Koordinatensystem bzw. die relative Orientierung zwischen den beiden virtuellen Kameras wird im Rahmen der Kamerakalibrierung des Messsystems vorab bestimmt. Um den Bezug zum Koordinatensystem des Prüfstandes herzustellen, werden bei der Messung die Koordinaten einzelner Punkte, deren Koordinaten im Prüfstandssystem bekannt sind, im Koordinatensystem des Stereospiegelvorsatzes bestimmt. Über diese Punkte wird anschließend die gesamte Messung vom Koordinatensystem des Stereospiegelvorsatzes in das Prüfstandskoordinatensystem transformiert.

Die messtechnischen Anforderungen aus der EU-Richtlinie an die Flugbahn des Beinimpaktors beziehen sich auf seinen Mittelpunkt, also einen virtuellen Punkt, der nicht direkt gemessen werden kann. Das Koordinatensystem der Vorvermessung des Beinimpaktors wurde so orientiert und positioniert, dass der Ursprung exakt im gesuchten Mittelpunkt liegt, die Z-Achse der Hochachse des Beines und die X-Achse der späteren Schussrichtung entspricht. Über die Marken am Beinimpaktor wird nun das Ergebnis der Vorvermessung auf jeden Zeitpunkt der Bildsequenzauswertung, die im Prüfstandskoordinatensystem vorliegt, transformiert. Die Transformationsparameter geben somit die Position und die Orientierung des Koordinatensystems des Beinimpaktors für jeden einzelnen Zeitpunkt der Sequenz im Koordinatensystem des Prüfstands an. Anhand der Restklaffungen dieser Transformation kann überprüft werden, ob sich die Position der Marken zueinander verändert hat. In einem nachverarbeitenden Schritt werden aus den Transformationsparametern für jeden Zeitpunkt die gesuchten Winkel entsprechend der EU-Richtlinie ermittelt.

Abb. 6: Bild aus einer Versuchssequenz (Stereospiegelvorsatz)

4.3 Ergebnisse mit Prüfprotokoll

Die zu überprüfenden fünf Winkel werden inklusive ihrer Standardabweichung bestimmt und mit den zulässigen Toleranzen verglichen. Für die Dokumentation der Ergebnisse wird ein Prüfprotokoll erstellt, in dem die gemessen Winkeln inklusive Standabweichungen und zulässiger Toleranz (vgl. Abb. 7) aufgeführt sind. Bei dem ausgewerteten Versuch traf der Beinimpaktor in der Horizontal-Ebene unter einem Winkel von 0,37° mit einer Standardabweichung von 0,06° auf. Die maximal zulässige Abweichung von ±2 wurde deutlich unterschritten. Die Anforderung an das Messsystem, den Winkel mit einer Messgenauigkeit zu messen, die um den Faktor 5–10 besser ist als die zulässige Toleranz, wurde ebenfalls deutlich unterschritten.

Abb. 7: Ausschnitt aus dem Prüfprotokoll – Darstellung der Ergebnisse für die Winkel der Flugbahn

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das im vorliegenden Artikel vorgestellte Verfahren ist das erste optische Verfahren für die Überprüfung der messtechnischen Anforderungen zur Versuchsdurchführung nach der EU-Richtlinie 2003/102/EG. Die durchgeführten Versuchsreihen haben die Praxistauglichkeit des Verfahrens belegt. Die erforderlichen Genauigkeitsanforderungen werden mit dem Stereospiegelvorsatz als Messsystem erreicht. Durch den hohen Automatisierungsgrad kann das Verfahren einfach und mit geringem Zeitaufwand in den Prozessablauf bei Fußgänger-

schutzversuchen bei der Volkswagen AG integriert werden. Zurzeit wird dieses Verfahren in weiteren Versuchsreihen mit verschiedenen Fahrzeugprojekten getestet. In der EU-Richtlinie sind neben den Versuchen mit dem Beinimpaktor auch Versuche mit einem Kopfimpaktor spezifiziert. Dafür werden zurzeit Genauigkeitsabschätzungen gemacht und es wird überprüft, ob sich das vorgestellte Messsystem auch für diese Versuchsart eignet. Neben der Anwendung im Bereich der Fußgängerschutzversuche werden auch weitere Einsatzbereiche für das Messsystem Stereospiegelvorsatz im Bereich der Fahrzeugsicherheit in der Automobilentwicklung geprüft.

Literatur

EU-Richtlinie 2003/102/EG (2004): *Richtlinie 2003/102/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG.* In: Amtsblatt der Europäischen Union, 04.02.2004. 48 S.

Hastedt, H., Luhmann, T. & K. Raguse (2005): *Three-dimensional Acquisition of High-Dynamic Processes with a Single-Camera System and Stereo-Beam Splitting*. In: Grün, A. & H. Kahmen (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII, Vol. II. 175-184

Insel, O. & J. Stein (2003): *Mehr Sicherheit für Fußgänger*. In: IAV Automotion, Ausgabe 4. 8

Luhmann, T. (2005): *Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung*. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), Heft 2. 101-110

McClenathan, R. V., Nakhla, S. S., McCoy, R. W. & C. C. Chou (2005): *Use of Photogrammetry in Extracting 3D structural Deformation/Dummy Occupant Movement Time History During Vehicle Crashes*. In: SAE Technical Paper 2005-01-0740. 7 S.

Raguse, K., Derpmann-Hagenström, P. & P. Köller (2004): *Überlagerung von Bildinformationen von Berechnungsanimation und Highspeed-Filmsequenzen mit Methoden der 3D-Bildmesstechnik*. In: Bonfig, K. W. (Hrsg.): Messen, Prüfen, Automatisieren, Band 5, Sensoren Signale Systeme, b-Quadrat Verlag, Kreuztal. 199-208

Schulte, D.-H. (2003): *Versuch und Simulation zur Verbesserung des Fußgängerschutzes*. In: Automotive Engineering Partners 5/2003. 48-52

Strutz, T. & V. Schriever (2005): *Frontendgestaltung für den passiven Fußgängerschutz*. 2. Braunschweiger Symposium „Faszination Karosserie“

Blick in die Sterne – Einsatz des Photogrammetriesystems V-STARS in der Luft- und Raumfahrtindustrie

Ingo JAHN

Zusammenfassung

Im folgenden Beitrag werden Anwendungen des photogrammetrischen Aufnahme- und Auswertesystems *V-STARS* an Beispielen aus der Luft- und Raumfahrtindustrie beschrieben. Alle Projekte wurden von der GDV Ingenieurgesellschaft als vermessungstechnische Dienstleistungen durchgeführt. Daher steht in diesem Beitrag die praktische Anwendung des ausgereiften Messsystems *V-STARS* von GSI im Vordergrund. Technisch und wissenschaftlich anspruchsvolle Messaufgaben, angefangen bei der produktionsbegleitenden Vermessung an *Ariane 5*-Tankböden über Deformationstests unter simulierten Weltraumbedingungen bis zur Kalibrierung der Sensorik des *SOFIA*-Teleskopes, sollen unterschiedliche Messabläufe praxisnah erläutern.

1 Einleitung

Die modernen Technologien der Luft- und Raumfahrtindustrie eröffnen uns immer tiefere Einblicke bis in die Anfänge des Universums. Informationen, die mit Lichtgeschwindigkeit zu uns kommen, lassen sich mit hochsensiblen Instrumenten auffangen und analysieren. Trägerraketen wie die europäische *Ariane 5* sorgen für den Transport von Satelliten in den Orbit. Ebenso lassen sich Weltraumbeobachtungen mit komplexen Empfangs- und Steuersystemen von speziellen Parabolantennen auf der Erdoberfläche oder aus dem Flugzeug durchführen.

Zur Herstellung und Einrichtung dieser Sensoren sind präzise Messsysteme erforderlich. Die GDV Ingenieurgesellschaft Holst mbH aus Bad Schwartau setzt seit nahezu 20 Jahren photogrammetrische Messverfahren ein und unterstützt mit Dienstleistungen unterschiedlichste industrielle Anwendungen. Dabei arbeitet die GDV eng mit Geodetic Systems Inc. (GSI), dem Hersteller und Entwickler des *V-STARS* Photogrammetriesystems aus Florida, U.S.A., zusammen.

2 Die GDV – Dienstleistungen mit mobiler optischer Messtechnik

Die GDV Ingenieurgesellschaft hat sich seit 1987 auf vermessungstechnische Dienstleistungen mit mobilen Systemen spezialisiert und betreut weltweit Kunden unterschiedlichster Branchen. Dabei kommen in der Regel Lasertracker, Photogrammetrie, Streifenprojektion und weitere hochgenaue Verfahren zum Einsatz. Überwiegend beschäftigt die GDV Vermessungsingenieure, die mit ihrem Know-how im Bereich der mobilen 3D-Messtechnik vielfältige industrielle Applikationen und Projekte betreuen.

Die Photogrammetriesysteme aus dem Hause GSI werden seit 1989 für Lohnmessungen eingesetzt und haben sich im praktischen Einsatz bewährt. Mit der Tochterfirma GDV Systems GmbH bietet die GDV seit 2004 auch den Vertrieb des *V-STARS*-Systems an. Durch die Möglichkeit, Dienstleistungen und Systemvertrieb aus einer Hand anzubieten, entstand eine leistungsstarke Verbindung, mit der sehr flexibel auf unterschiedliche Anforderungen im industriellen Umfeld reagiert werden kann.

3 Das V-STARS-Photogrammetriesystem

V-STARS ist ein mobiles, photogrammetrisches Koordinaten-Messsystem, das sowohl unter Verwendung einer einzelnen *INCA*-Kamera die schnelle und hochgenaue „offline"-3D-Erfassung signalisierter Punkte, als auch unter Verwendung von zwei oder mehr *INCA*-Kameras präzise „online"-Messungen an statischen oder dynamischen Objekten ermöglicht (Abb. 1).

Abb. 1: V-STARS-Photogrammetriesystem (GDV 2006)

Die Entwicklung dieser leistungsstarken Systeme erfolgt im Hause GSI in Florida. Die Messkameras der neuesten Generation (*INCA 3*) verfügen über einen extrem ebenen und stabilen 8 Megapixel Chip und wiegen nur noch 50 % ihrer Vorgängermodelle (*INCA 1/2*). Die bewährten Komponenten wie der eingebaute Computer zur automatischen Bildmessung und -kompression sowie das robuste Metallgehäuse runden das System für den praxisgerechten Einsatz in industrieller Umgebung ab.

Ein besonderer Vorteil ist die hohe Mobilität dieses portablen 3D-Messsystems. So ist weltweit jedes Ziel problemlos per Flugzeug erreichbar. Für „offline"-Messungen werden neben der Kamera lediglich die benötigten reflektierenden Messmarken und Adapter, transportable Referenzmaßstäbe sowie ein handelsüblicher PC benötigt. Für „online"-Messungen werden zusätzlich zur zweiten Kamera kabellose Messtaster („Probe") mitgeführt.

Die Genauigkeit im „offline"-Mode beträgt ±0,01 mm/m und stützt sich auf redundante Aufnahmen aus verschiedenen Perspektiven, die das Messobjekt dreidimensional beschreiben. Für alle Messwerte erfolgt eine Bündelausgleichung in der *V-STARS*-Software. Das

„online“-System erlaubt Genauigkeiten von ±0,1 mm bei extrem flexiblen Einsatz. Aufnahmen können sogar von beweglichen Plattformen erfolgen, ohne dass die Genauigkeit der Messung beeinträchtigt wird (GDV 2006, GSI 2006).

4 Einsatzbeispiele aus der Praxis

4.1 Geometrische Überprüfung von Ariane 5-Tankböden

Um Satelliten im Orbit zu platzieren, sind Trägersysteme wie die europäische *Ariane 5*-Rakete erforderlich. Schon in der Fertigung dieser teuren und nur einmal verwendbaren Antriebssysteme werden höchste Anforderungen an die Qualitätssicherung gestellt. Einige Aufgaben, wie die Form- und Lageprüfung an *Ariane 5*-Tankböden, den so genannten „Bulk-Heads“ (Abb. 2), lassen sich mit industrieller Photogrammetrie in der Produktion lösen.

Abb. 2: Ariane 5-Tankböden „Bulk Heads“ (MT-AEROSPACE 2006)

An den *Ariane 5*-Tankböden sind vor allem die Aspekte Rundheit, Ebenheit und Konzentrizität zu prüfen sowie das Tankvolumen zu bestimmen. Dazu ist es erforderlich, die einzelnen „Bulk-Heads“ sowohl von innen als auch von außen zu vermessen. Die geometrische Grundform ist im Wesentlichen eine Halbkugel mit einem Durchmesser von 5,4 m. Insbesondere der innere Bereich wird mit einem sehr dichten Punktraster versehen, sodass eine anschließende Volumenberechnung zuverlässig erfolgen kann.

Die eigentliche Digitalisierung aller Messpunkte wird dabei in zwei Abschnitte geteilt: innere und äußere Struktur werden in getrennten Bildverbänden erfasst. Um hieraus eine einheitliche Punktwolke zu generieren, werden beide Bildverbände über eine Vielzahl identischer Punkte in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert. Insgesamt sind hier 100 bis 150 Aufnahmen je Messung erforderlich, die mit einer Genauigkeit von unter ±0,1 mm miteinander verknüpft werden. In der einmal erzeugten Punktwolke lassen sich nun alle erforderlichen Auswerteschritte automatisiert berechnen.

4.2 Geometrische Überprüfung der Ariane 5-ELS-Ringe

Die so genannten *ELS-Ringe* trennen den Nutzlastbereich von der oberen Antriebsstufe der Rakete. Auch hier sind Messungen nach Form und Lage gefordert. Aufgrund der Dimensi-

onen wäre eine Vermessung auf einer Koordinatenmessmaschine nicht möglich. Mit dem Einsatz des *V-STARS*-Systems kommt die mobile Messmaschine zum Prüfling.

In einem ersten Schritt wird das örtliche Referenzsystem auf codierte Zielmarken übertragen. Diese werden von der *V-STARS*-Software automatisch erkannt und dienen der Referenzierung der folgenden Messungen. Hier kommt der kabellose Messtaster zum Einsatz, dessen Tastspitze zuvor über ein definiertes Muster aus retroreflektierenden Messmarken kalibriert worden ist. Somit lassen sich Konturen direkt am Bauteil taktil vermessen. Die Bildaufnahmen werden von zwei Kameras simultan durchgeführt. Alle 3D-Koordinaten stehen unmittelbar nach Auslösung der Messung am Bildschirm zur Verfügung. Die vollständige Auswertung erfolgt nach Abschluss aller Aufnahmen in vorgefertigten Tabellen.

4.3 Deformationsmessungen unter simulierten Weltraumbedingungen (Thermal-Vakuumtest)

Nach Betrachtung des *Ariane 5*-Trägersystems soll im Folgenden auf die Deformationsmessung von potenziellen Nutzlasten eingegangen werden.

Objekte wie Satelliten oder Antennen, die in den Orbit gelangen, müssen höchsten Qualitätsanforderungen genügen. Die Strukturen sollen möglichst leicht sein, um die vorhandenen Nutzlastkapazitäten einzuhalten. Zusätzlich wird ein hohes Maß an Formstabilität gefordert. Sollte erst im Orbit ein Fehler an einer Satellitenstruktur festgestellt werden, so ist dieses Objekt nicht mehr reparabel, da Weltraumarbeiten schlichtweg zu teuer sind. So sind umfangreiche Tests unter Weltraumbedingungen in geeigneten Testzentren unerlässlich.

Die Belastung der Oberflächenstruktur von Parabolantennen wird u. a. im „Thermal-Vakuumtest“ simuliert. Hierbei muss der Prüfling verschiedene Testzyklen unter Hoch- und Tieftemperaturen (ΔT bis ca. 300° C) in einer Thermal-Vakuumkammer (Abb. 3) überstehen.

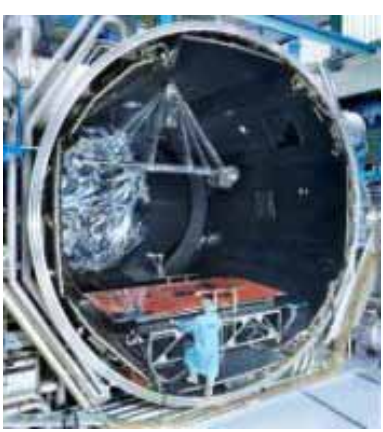


Abb. 3: Thermal-Vakuumkammer (IABG 2006)

Die Oberfläche einer Parabolantenne wird rasterförmig mit Messpunkten versehen, um eine Verformung der Struktur sichtbar zu machen. Die Kamera selbst befindet sich bei der Auf-

nahme der Messbilder in einem speziellen Kanister, in dem während der Messungen Druck und Temperatur stabil sind.

Die extremen Bedingungen der simulierten Weltraumumgebung erfordern aber noch weitere Anpassungen des Messaufbaus. So lassen sich die codierten Messmarken zur Bildorientierung auf ihrem Standardträgermaterial nicht verwenden. Dieses Material würde unter Weltraumbedingungen ausgasen und die Thermal-Vakuumkammer kontaminieren. Um dieses zu vermeiden, wurden eigens codierte Marken auf einer geeigneten Trägerfolie angefertigt. Darüber hinaus muss die Skalierung den extremen Anforderungen genügen. So kommen hier spezielle kalibrierte Glaskeramikmaßstäbe (Zerodur®) zum Einsatz. Deren thermische Längenausdehnung ist minimal, da sie aus zwei Komponenten bestehen, die sich gegenläufig dehnen bzw. stauchen.

Alle Messungen erfolgen ferngesteuert. Die Daten werden online von der Kamera auf den Auswerterechner übertragen. Durch das Messen in definierten Positionen rund um das Messobjekt ergeben sich extrem homogene Bildverbände. So werden je nach Objektgröße Genauigkeiten von ca. ±0,01 bis 0,02 mm (2σ) erzielt.

4.4 PLANCK-Teleskop – Stabilitätsanalyse im Vibrationstest

Nicht nur unter Weltraumbedingungen, sondern bereits während der Startphase an Bord der Trägerrakete sind empfindliche Satelliten großen Belastungen ausgesetzt. So soll im Folgenden anhand eines Vibrationstestes am *PLANCK*-Teleskop (Abb. 4) die Messung von Deformationen unter Startbedingungen erläutert werden.

Abb. 4: PLANCK-Teleskop (WIKIPEDIA 2006)

Untersucht wurde hier ein sensibles Teleskop, das, einmal im Orbit, zur Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung eingesetzt werden soll. Hierzu verfügt der Satellit über hochempfindliche Spiegel, die einfallende Strahlung mit einer Auflösung von ca. einem

Millionstel Grad Celsius abbilden können. Vibrationen, die beim Raketenstart die Position der Präzisionsspiegel zueinander verschieben können, werden zuvor simuliert. Vor dem tatsächlichen Start können die Spiegel dann anhand der Untersuchungsergebnisse und weiterer Modellparameter vorjustiert werden, sodass sie im All ihre endgültige berechnete Lage zueinander einnehmen.

Der Testplan sah nach einer Nullmessung zunächst eine zweite Messung zur Verifizierung der Wiederholgenauigkeit der Messung vor. Anschließend wurde jeweils eine Messung vor und nach einem Vibrationslauf für jede Achsrichtung durchgeführt. Alle Messungen wurden über eine einheitliche Referenz an der Satellitenstruktur ausgerichtet. Auf diese Weise konnten die Deformationen in den fest angebrachten Messpunkten miteinander verglichen werden. Die besondere Anforderung an die Messung bestand hier in der Verknüpfung von innerer und äußerer Satellitenstruktur. So entstand ein relativ inhomogener Bildverband mit ca. 200 Aufnahmen. Dennoch wurde nach der Bündelausgleichung ein RMS-Wert von ±0,03 mm (2σ) erreicht. Somit konnten alle Abweichungen hinreichend genau angegeben werden. Besonders wertvoll für die Analyse der einzelnen Testläufe erwies sich die Darstellung im 3D-Viewer der *V-STARS*-Software. Dies erlaubte die visuelle Prüfung der tabellarischen Werte mit dem Auftraggeber direkt vor Ort.

4.5 7-m-Parabolantenne – Paneeljustage und Deformationstest

Ein Beispiel ganz anderer Art soll im nächsten Abschnitt dargestellt werden. An exponierter Lage auf der Erdoberfläche stationierte Parabolantennen werden für vielfältige Weltraumbeobachtungen eingesetzt. Auch hier ist eine präzise Fertigung unerlässlich. Mit dem *V-STARS*-System konnten in der Vergangenheit bereits eine Reihe solcher Parabolantennen unterschiedlichster Größen auf Baustellen rund um den Globus justiert oder überprüft werden. Ein Beispiel hierfür ist die 7-m-Parabolantenne in Abbildung 5 (rechts).

Abb. 5: 7-m-Parabolantenne (BUNDESNETZAGENTUR 2006)

Die Messaufgabe bestand dabei neben der Justage der Reflektorpaneele und dem Einmessen des Subreflektors („Feedbox“) in der Bestimmung der Achslagen in den geodätischen Koordinatensystemen WGS84 und ED50 sowie im Rahmen einer weiterführenden Diplomarbeit in der Deformationsanalyse des Antennenkörpers (HOLST 2005).

Die zu justierenden Reflektorpaneele stellen kleine Abschnitte der paraboloidischen Antennenoberfläche dar. Diese sind an der Unterseite auf insgesamt 84 Stellschrauben gelagert. Zur Justage werden auf der Antennenoberseite gegenüber den Stellschrauben Messmarken angebracht. Alle erforderlichen Messungen werden in der Regel aus einem Hubwagen durchgeführt, um einen geschlossenen Rundumverband zu erhalten. Aufgrund des störenden Reflektionsgrades bei Sonnenlicht lassen sich die Bildaufnahmen optimal bei Dunkelheit durchführen. Die Justage der Antennenoberfläche erfolgt dabei in einem iterativen Prozess. Nach jeder Messung wird die erzeugte Punktwolke auf die Sollform transformiert. Hieraus ergeben sich Korrekturwerte für die einzelnen Stellschrauben. Der Stellprozess wurde in diesem Beispiel so lange wiederholt, bis sich für die Antennenoberfläche ein RMS-Wert von unter ±0,1 mm einstellte.

4.6 Kalibrierung von Bildstabilisatoren am Projekt SOFIA

Eine besondere Beobachtungsplattform findet sich am Beispiel des *SOFIA*-Projektes (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy). Um Beobachtungen mit infraroten Wellenlängen, die vom Erdboden aus nicht durchführbar sind, zu ermöglichen, wird ein Teleskop in eine Boeing 747 mit aufklappbarem Dachsegement eingebaut (Abb. 6). Da das Teleskop hierbei nicht mehr ruht, sondern den Flugzeugbewegungen ausgesetzt ist, wird es in einer kardanischen Aufhängung montiert. Während des Fluges erfassen spezielle Sensoren kleinste Lageveränderungen. Digitale Antriebe gleichen die resultierende Zielabweichung durch Gegenbewegung direkt aus. Somit bleiben beobachtete Sterne jederzeit fokussiert.

Abb. 6: Boeing 747 mit Öffnung für das SOFIA-Teleskop (SOFIA 2006)

Zur Kalibrierung der Sensorik war die Erstellung einer nichtlinearen 3D-Korrekturmatrix erforderlich. Diese war notwendig, um die nichtmetrischen Signale der Bewegungssensoren an die Kompensationsantriebe weiterzugeben. Zur Ermittlung dieser Daten wurden Messmarken am später im Flugzeug montierten unbeweglichen Teil und am kompensierbaren beweglichen Teil der Anlage angebracht.

Der Messplan sah im Einzelnen zunächst eine Nullmessung zur Referenzierung über vorhandene Passbohrungen vor. Anschließend wurde eine definierte Anzahl Messpunkte auf dem beweglichen Element gegen die Referenzpunkte auf dem unbeweglichen Element in

3°-Schritten verdreht und gemessen. Die gewünschte Korrekturmatrix konnte aus den Differenzen der Messwerte und der Steuerwerte ermittelt werden.

5 Fazit

Die Anwendungen digitaler Photogrammetrie in der Luft- und Raumfahrtindustrie sind weit gefächert. Mithilfe des vorgestellten *V-STARS*-Systems ist sowohl die Durchführung von Routinearbeiten als auch die Lösung von Spezialaufgaben möglich. Der besondere Vorteil liegt in der hohen Mobilität und Flexibilität des Systems. So können „offline"-Aufgaben der klassischen Nahbereichsphotogrammetrie ebenso ausgeführt werden wie taktile „online"-Messungen von statischen und dynamischen Objekten. Dabei lassen sich alle Messungen auch unter instabilen Umgebungsbedingungen erfolgreich durchführen. Das vorgestellte Aufgabenspektrum umfasst exemplarische Beispiele, die auch auf vielfältige weitere Anwendungen geometrischer Prüf- und Kontrollmessungen übertragen werden können. Gerade mit ihren hohen Anforderungen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit dreidimensionaler Messungen ist das vorgestellte Spektrum der Luft- und Raumfahrtindustrie gut geeignet, die Vielfältigkeit des V-STARS-Photogrammetriesystems zu erläutern und im übertragenden Sinn den „Blick in die Sterne" zu ermöglichen.

Literatur

Bundesnetzagentur (2006): Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Mainz. www.bundesnetzagentur.de (09.02.2006)

Contraves (2006): Contraves Space AG, Zürich, Schweiz. www.contraves.com (09.02.2006)

GDV (2006): GDV Ingenieurgesellschaft Holst mbH, Bad Schwartau. www.gdv-systems.de (09.02.2006)

GSI (2006): Geodetic Systems Inc., Melbourne, Florida, U.S.A. www.geodetic.com (09.02.2006)

Holst, C. (2005): *Deformationsanalyse der Parabolantenne 7m XY MBA*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen (IAGB), Universität Stuttgart

IABG (2006): Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft, Ottobrunn. www.iabg.de (09.02.2006)

MT-Aerospace (2006): MT Aerospace AG, Augsburg. www.mt-aerospace.de (09.02.2006)

SOFIA (2006): SOFIA Projektbüro, Institut für Planetenforschung, DLR. www.solarsystem.dlr.re/Missions/SOFIA (09.02.2006)

Wikipedia (2006): Wikipedia Internetseiten. http://de.wikipedia.org (09.02.2006)

Photogrammetrische Bestimmung von Bohrungen für industrielle Anwendungen

Bernd-Michael WOLF

Zusammenfassung

Der Einsatz photogrammetrischer Systeme im industriellen Umfeld ist häufig beschränkt auf Aufgaben, die eine Signalisierung von Messpunkten mit Markern erlauben. Die 3D-Koordinaten dieser Marker können mit hoher Präzision schnell, zuverlässig und ohne Transport des Prüflings bestimmt werden. Beim In-Line-Einsatz in der Fertigungslinie muss für die Vermessung jedoch auf Markierungen verzichtet werden. In diesem Beitrag wird ein Operator für die photogrammetrische Messung von Bohrungen vorgestellt, mit dessen Hilfe die Koordinaten von Bohrungen ohne Marker bestimmt werden können.

1 Einleitung

Ausgehend von den typischen Aufgaben der Photogrammetrie und der Industriellen Bildverarbeitung, dem metrischen Messen in 3D im Gegensatz zu vergleichenden Messungen in 2D, kann man Unterschiede zwischen den Techniken vor allem in den Verfahren, den typischen Abbildungsmaßstäben, der Redundanz und der Mobilität der Systeme erkennen. Der hohen Präzision, die heute bei der 3D- Punktmessung durch Redundanz und dem Einsatz von Markern erreicht wird, steht eine Genauigkeit der 2D-Kantenantastung gegenüber, die etwa um eine Größenordnung schlechter ist als die eines Ellipsenoperators. Dies wird in der industriellen Bildverarbeitung in der Regel durch einen entsprechend geringeren Abbildungsmaßstab wieder kompensiert (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Vergleich von Photogrammetrie und Industrieller Bildverarbeitung

	Photogrammetrie	**Industrielle Bildverarbeitung**
Typische Aufgaben	Metrisches Messen in 3D Deformationsanalysen	2D-Messen Erkennen von Fehlstellen
Grundlegende Verfahren	2D-Punktmessung 3D-Orientierung 3D-Punktbestimmung	2D-Kantenantastung Erkennen einfacher Geometrien
Abbildungsmaßstab	Ca. 1:100 bis 1:1000	Ca. 1:1 bis 1:10
Redundanz	Hoch	Niedrig
Mobilität	Ja	Nein

Heute werden Baugruppen, die von verschiedenen Herstellern produziert werden, zu immer komplexeren Produkten montiert und es wird für die einzelnen Hersteller immer wichtiger, die Funktion und die Maßhaltigkeit der Bauteile garantieren zu können. Im Wesentlichen hängt die Qualität der Bauteile vom Herstellungsprozess, den Maschinen auf denen produziert wird und von den Mitarbeitern im Unternehmen ab. Aber nicht immer lassen sich Fehler im Fertigungsprozess vermeiden. Das Erkennen dieser Fehler wird mehr und mehr Industriellen Bildverarbeitungssystemen übertragen, die objektiv und zuverlässig die Geometrie und die Oberfläche von Bauteilen schon während des Fertigungsprozesses prüfen können.

Durch eine stärkere Integration photogrammetrischer Orientierungsverfahren mit industriellen Bildverarbeitungssystemen können auch 3D-Inspektionsaufgaben In-Line in der Fertigung durchgeführt werden. Eine Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die gesuchten Merkmale bestimmt werden können, ohne sie mit Messmarken versehen zu müssen.

Wichtige konstruktive Elemente an technischen Teilen sind Bohrungen. In einigen Fällen sind Bohrungen sogar die wesentlichen geometriebestimmenden Elemente, beispielsweise bei Haltevorrichtungen und Trägerelementen. In Abbildung 1 ist ein Träger abgebildet, der die unter dem Armaturenbrett eines Autos montierten Baugruppen hält, wie z. B. Teile des Heizungs-Lüftungssystems, dem Radio und den Instrumenten. Die funktionsbestimmende Geometrie dieses Bauteils ist durch seine Bohrungen definiert. Man kann sich leicht vorstellen, dass es ein Problem darstellt, wenn sich beispielsweise die Instrumentenkombination nicht montieren lässt, weil die Bohrungen des Trägers nicht an den korrekten Positionen sind.

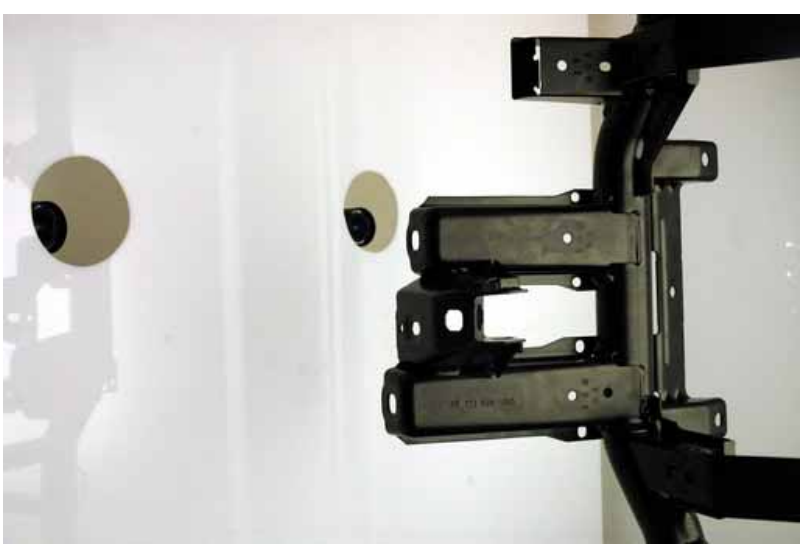


Abb. 1: Schweißbaugruppe mit Bohrungen, im Hintergrund sind zwei Kameras des PrOMT-Messsystems zu sehen.

Geschweißte Teile lassen sich jedoch nicht beliebig genau herstellen, sie müssen in aller Regel nach dem Schweißen noch gerichtet werden. Darauf zielt das Projekt „Wissenschaftliche Grundlagen für ein Mess- und Richtzentrum mit integrierter Bildverarbeitung, parallelkinematischer Bewegungseinrichtung und intelligenter Richtstrategie“[1]. Die Messung der Bohrungen kann in diesem Fall im Durchlicht unter Verwendung eines üblichen Ellipsenoperators erfolgen. In vielen Fällen ist es jedoch nicht möglich, eine Durchlichtanordnung zu wählen. Hierfür haben wir einen Operator entwickelt, mit dem es möglich ist, Bohrungen auch unter beleuchtungstechnisch ungünstigen Umständen zu bestimmen.

2 Ein Operator für die Messung von Bohrungen

Eine natürliche Definition der 3D-Position einer Bohrung ist genau der Punkt im Raum bzw. auf dem Werkstück, der dem Schnittpunkt der Bohrungsmittelachse mit der – gedachten – Werkstückoberfläche entspricht. Diesen Punkt erhält man, entsprechend der Messung einer Marke, durch vorwärts Einschneiden des Mittelpunkts der Bohrung in mindestens zwei Bildern.

Im Durchlicht (vgl. Abb. 1) werden mit einem Ellipsenoperator gute Resultate erzielt. Wegen des hohen Kontrasts an den Kanten findet man ähnliche Verhältnisse vor wie bei der Messung signalisierter Punkte (vgl. Abb. 2 rechts unten). Die Situation im Auflicht ist für die Bildverarbeitung wesentlich schwieriger. Der Grund dafür ist, dass in unmittelbarer Nähe der gesuchten Kante auf dem Rand der Bohrung andere Kanten liegen, die für die Bestimmung des Bohrungsmittelpunktes nicht herangezogen werden dürfen (vgl. Abb. 2 rechts oben).

Die Bestimmung des Bohrungsmittelpunktes im Raum unterscheidet sich, vom Standpunkt der Photogrammetrie aus betrachtet, nicht grundsätzlich von der Bestimmung des Mittelpunktes einer Marke. Der Mittelpunkt einer Ellipse im Bild wird vorwärts eingeschnitten und man erhält die gesuchte 3D-Koordinate des signalisierten Punktes. Vom Standpunkt der Bildverarbeitung besteht das Problem darin, aus den detektierten Kanten diejenigen zu selektieren, die auf dem gesuchten Rand der Bohrung liegen. Wenn es gelingt, diese Kanten auszuwählen, kann der Mittelpunkt, genau wie bei einer Messmarke, mit einer Ellipsenausgleichung bestimmt werden.

Die Bestimmung des Bohrungsmittelpunktes besteht demnach im Wesentlichen aus zwei Schritten, der Detektion des Randes mit einem Kantendetektor und der Berechnung des Markenmittelpunktes. Die Kantendetektion kann dabei entweder in 1D strahlenförmig vom vermuteten Mittelpunkt der Marke aus durchgeführt werden oder mit einem 2D-Kantendetektor. Die 2D-Kantenbestimmung ist seit einigen Jahren gut verstanden und kann mit einer Genauigkeit im Bereich des Zehntels eines Pixels durchgeführt werden, wenn der im Linearen Maßstabsraum (LINDEBERG 1994) durch die Tiefpassfilterung mit einem Gauß-Kernel auftretende Versatz der Kante geeignet korrigiert wird (STEGER 1998).

---

[1] Die 3D-Erfassung der Bohrungen erfolgt mit einem Messsystem der SOLVing3D GmbH. Informationen zum Projekt auf http://iwm.mw.tu-dresden.de/forsch/fo_kamera_hexapod.html

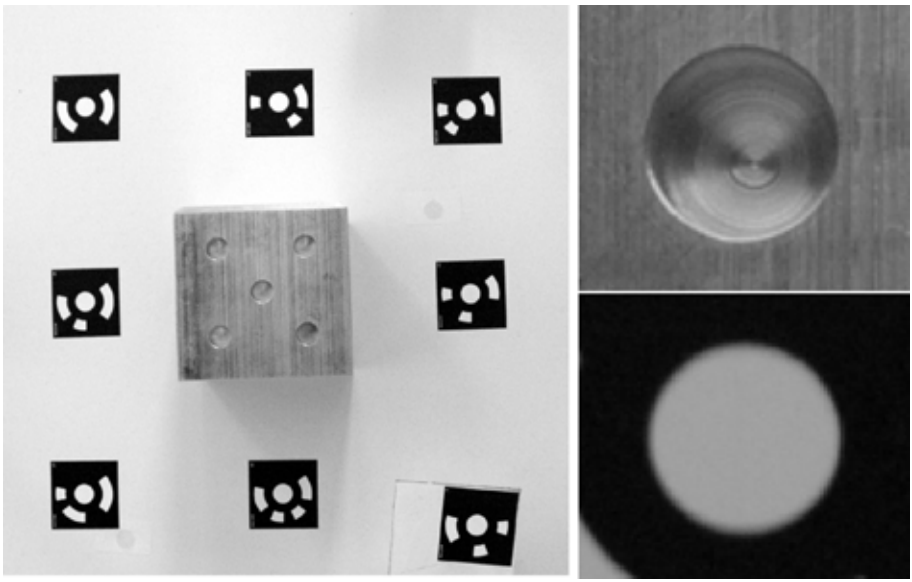


Abb. 2: Die linke Abbildung zeigt einen Würfel mit fünf Bohrungen (Sacklöcher), im Hintergrund sind Messmarken. Rechts oben ist eine der Bohrungen vergrößert dargestellt, rechts unten zum Vergleich die Messmarke.

In Abhängigkeit von den lokalen Kontrastverhältnissen erhält man als Ergebnis der Kantendetektion Punkte auf und neben dem gesuchten Rand der Bohrung, die zu Linien gruppiert werden können (vgl. Abb. 3 Mitte). Im Folgenden werden diejenigen Punkte, die nicht auf dem Rand der Bohrung liegen, als Ausreißer bezeichnet. Wegen der hohen Anzahl der Ausreißer, oftmals über 30 % aller Kantenpunkte, wird ein robustes Verfahren benötigt, um den Mittelpunkt der Bohrung zu bestimmen.

Allein mit einem robusten M-Schätzer nach Huber (KOCH 1997) können die Ausreißer nicht immer eliminiert werden. Ein Konzept, dass sich bei der automatischen Interpretation von Bildern (siehe z. B. BALTSAVIAS et al. 2001) als sehr leistungsfähig herausgestellt hat, ist zunächst eine Hypothese auf Basis der Daten zu formulieren und diese anschließend auf ihre Gültigkeit hin zu testen. Ein formalisiertes und zuverlässiges Verfahren, mit dem dieses Konzept umgesetzt werden kann, ist der Random Sample Consensus Algorithmus (Ransac, FISCHLER & BOLLES 1981), der ursprünglich für die Lösung des Orientierungsproblems vorgeschlagen wurde. Die Grundidee des Ransac-Algorithmus ist es, aus der Menge der Beobachtungen zunächst nicht mehr zu verwenden, als zur Lösung des Gleichungssystems mindestens benötigt werden. Die Beobachtungen werden zunächst zufällig ausgewählt. Anschließend wird geprüft, ob es einen Konsens gibt, d. h. ob die Mehrzahl der anderen Beobachtungen diese Lösung bestätigt oder nicht. Tritt der Konsens ein, wurde eine Lösung gefunden, andernfalls stellt man eine neue Hypothese mit anderen zufällig ausgewählten Beobachtungen auf und wiederholt den ersten Schritt. Damit können genügend Ausreißer aussortiert werden, um die Ellipsenausgleichung beispielsweise mit einem Huber-Schätzer durchführen zu können.

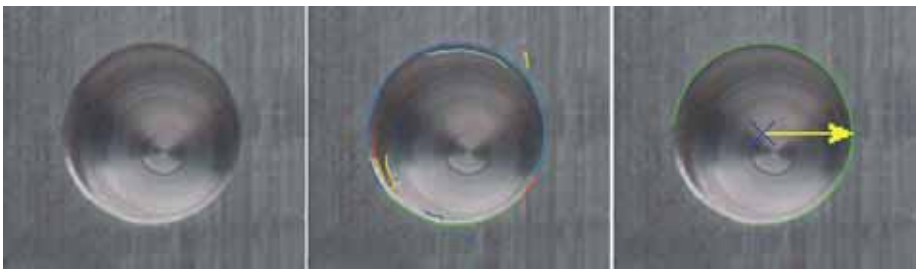


Abb. 3: Bestimmung des Mittelpunkts eines Sacklochs mit dem Bohrungsoperator. Links: Bildausschnitt mit Sackloch, Mitte: extrahierte Kanten im Bereich der Bohrungskante, rechts: Ergebnis

Tests mit Bildern, bei denen ein dünnes Aluminiumblech jeweils einmal im Auflicht und einmal im Durchlicht aufgenommen wurde (vgl. WOLF & ROLAND 2004), haben gezeigt, dass mit dem hier vorgestellten Operator Genauigkeiten von 0,2 Pixel auch bei einer sehr hohen Anzahl (etwa 30 %, vgl. Abb. 3) von Ausreißern erreicht werden. Bei den üblichen Abbildungsmaßstäben (vgl. Tab. 1) lassen sich damit Genauigkeiten im Bereich in der Größenordnung von 0,1 mm im Objektraum realisieren.

Die Anzahl der notwendigen Iterationen ist im Wesentlichen abhängig von der Anzahl der Beobachtungen, die als Ausreißer eingestuft werden müssen. Je höher die Anzahl der Ausreißer, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Minimalkonfiguration einen Ausreißer enthält und nicht zur Lösung führt. Entsprechend länger dauert die Suche nach einer geeigneten Anfangshypothese. Durch Einführen von applikationsabhängigen Heuristiken oder verfeinerten Strategien für die Punktauswahl (RODEHORST 2004) kann der Suchraum eingeschränkt werden.

3 Zusammenfassung

Das Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten ist es, die Einsatzmöglichkeiten der Photogrammetrie in Richtung der 100%-In-Line-Prüfung in der Fertigung zu erweitern, Einsatzmöglichkeiten, die derzeitig oftmals der industriellen Bildverarbeitung vorbehalten sind. Hierzu wurde ein Operator für die automatische Messung von Bohrungen im Auflicht entwickelt. In einer kurzen Einführung wurde erläutert, welche Gemeinsamkeiten zwischen der photogrammetrischen Bestimmung eines Punktes und dem Mittelpunkt einer Bohrung bestehen und wo die Schwierigkeiten bei der Messung der Bohrung liegen.

Literatur

Baltsavias, M., Gruen, A. & L. Van Gool (Eds.) (2001): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images III*. A.A. Balkema Publishers, Lisse Abingdon Exton (PA) Tokio. 415 S.

Fischler, M. A. & R. C. Bolles (1981): *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*. Graphics and Image Processing, 6 (24). 381-395

Koch, K. (1997): *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. Dümmler, Bonn. 366 S.

Lindeberg, T. (1994): *Scale-Space Theory in Computer Vision*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA. 423 S.

Rodehorst, V. (2004): *Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie*. Wissenschaftlicher Verlag Berlin, Berlin. 155 S.

Steger, C. (1998): *Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D Images*. Utz, Wiss., München. 185 S.

Wolf, B.-M. & M. Roland (2005): *Aktive Konturen für die automatische Messung von natürlichen Punkten bei industriellen Anwendungen*. In: Seyfert (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung. DGPF, Rostock, Germany, Band 14. 279-284

Wenn's etwas mehr sein darf – Verschieben der Hauptpunktlage für eine optimale Stereoabdeckung

Dirk H. RIEKE-ZAPP

Zusammenfassung

Durch das Verschieben der Hauptpunktlage aus dem Bildzentrum lässt sich die Stereoabdeckung, beziehungsweise die Ausnutzung der Sensorfläche, bei terrestrischen Anwendungen sowie im Zweibildfall optimieren. Obwohl ein Versatz der Hauptpunktlage seit den ersten Messkammern von Meydenbauer in analogen Geräten zum Standard gehört, lässt sich für die digitale Photogrammetrie kaum eine geeignete Kamera mit versetzter Hauptpunklage finden. Das ALPA-Kamerasystem eignet sich für die digitale Bildaufnahme und beinhaltet zudem Objektive mit fix versetzter Hauptpunktlage. An einfachen Beispielen werden die Vorteile einer versetzten Hauptpunktlage gezeigt.

1 Einführung

In seinem Handbuch der Messbildkunst beschreibt MEYDENBAUER (1912) die Vorteile einer verstellbaren Hauptpunktlage für die terrestrische Photogrammetrie. Die Methode Pulfrich (MEYDENBAUER 1912) wendet das gleiche Prinzip für den Stereonormalfall an. Photogrammetrische Aufnahmekammern wurden seitdem lange in zwei Gruppen aufgeteilt: Kameras für terrestrische Anwendungen und Luftbild Kammern. Die ersteren wurden für terrestrische Anwendungen konzipiert und weisen häufig einen versetzten Hauptpunkt auf, um hohe Objekte vom Boden aus ohne Schrägstellen der Kamera aufnehmen zu können. Zu den letzten Modellen dieser Art gehören die Wild P31 und Wild P32. Die Aufnahmeplanung für diese beiden analogen Messkammern ist ausführlich bei KRAUSS (1993) beschrieben und kann leicht auf andere Kameras mit versetzter Hauptpunktlage übertragen werden. Universalmesskammern und Luftbildmesskammern weisen in der Regel eine Hauptpunktlage im Bildzentrum auf. Das Gleiche gilt für beinahe alle handelsüblichen Kameras, die im Fotohandel erhältlich sind. Da solche Kameras immer häufiger auch für photogrammetrische Projekte benutzt werden, wird die Hauptpunktlage im Bildzentrum von den Anwendern als Standard akzeptiert wird, ohne Vor- und Nachteile genauer zu hinterfragen.

Die digitale Photogrammetrie ist heut bei der Auswertung nicht mehr auf die möglichst parallele Anordnung der Sensorebene zur Objektebene angewiesen. Konvergent aufgenommene Bilder stellen für die Auswertung in einer Digitalen Photogrammetrischen Arbeitsstation (DPA) kein Hindernis dar. DPA erlauben auch die Verwendung von kalibrierten Kameras, die nicht speziell für die Photogrammetrie gebaut wurden. Diese Kameras sind günstiger, und geometrische Fehler in der Objektabbildung auf der Sensorfläche durch solche Kameras, können über Korrekturparameter ausgeglichen werden, die in einer Kamera-Kalibrierung ermittelt werden. Solche kalibrierten Amateur-Kameras haben deshalb mit Aufkommen der DPAs aufwändig konstruierte und dementsprechend teure Aufnahme-

kammern weitgehend ersetzt. Dieser Trend hat sich noch verstärkt, seitdem digitale Kameras für die Bildaufnahme verwendet werden. So wurden zum einen analoge Messkammern aus dem Markt gedrängt, zum anderen war die Unterscheidung von Kameras mit und ohne versetzte Hauptpunktlage irgendwann nicht relevant in der Praxis. Mittlerweile werden für photogrammetrische Aufnahmen quasi ausschließlich Kameras mit zentrierter Hauptpunklage verwendet.

Bei der Aufnahmeplanung terrestrischer Objekte und im Zweibildfall kommt bei Verwendung dieser Kameras oft die Frage auf, ob der Sensor optimal ausgenutzt wird. Da der Hauptkostenfaktor einer hochauflösenden Digitalkamera für photogrammetrische Anwendungen der Sensor ist, wird dieser Frage immer mehr Bedeutung zugemessen.

Das ALPA-Kamerasystem eignet sich für die digitale Bildaufnahme mit hochauflösenden Digitalmagazinen. Das Genauigkeitspotenzial für die Nahbereichsphotogrammetrie wurde bereits getestet (RIEKE-ZAPP et al. 2005). Das Kamerasystem beinhaltet eine Reihe von Objektiven, die mit fix versetzter Hauptpunktlage geliefert werden. Die Vor- und Nachteile solcher Objektive für die digitale Photogrammetrie werden an einem Beispiel zur Aufnahmeplanung erläutert. Zusätzlich werden Projekte, bei denen mit versetzter Hauptpunktlage gearbeitet wird, vorgestellt.

2 Verschieben der Hauptpunktlage

2.1 Zweibildfall – allgemein

Bei den meisten Kameras liegt die Hauptpunktlage im Bildzentrum. In diesem Bereich ist die Auflösung der Objektive am besten und es wird die beste Bildqualität erreicht. Für Reihenaufnahmen, zum Beispiel Luftbilder, kann mit einfachen Rechnungen eine optimale Flugplanung erstellt werden (ALBERTZ & KREILING 1989). Oft wird in Luftbildstreifen mit einer Überlappung in Flugrichtung von 60 % gearbeitet. Dieser Versatz stellt sicher, dass die Basis zwischen zwei Bildern möglichst groß ist und benachbarte Stereomodelle sich überlappen, sodass keine Lücken in der stereographischen Abdeckung des Untersuchungsgebietes entstehen. In der Regel gilt, je länger der Basisabstand, desto günstiger fällt das Verhältnis von Flughöhe zur Basis aus, welches auch als Maß für die erreichbare Genauigkeit in einem Projekt herangezogen wird (LUHMANN 2000).

Reduziert man seine Flugplanung für ein Projekt auf zwei Bilder, so werden bei 60%iger Überlappung jeweils 40 % der Sensorfläche nicht benutzt (Abb. 1). Dreht man die Kamera zwischen den beiden Aufnahmen um 180°, so wird jeweils die gleiche Sensorfläche nicht gebraucht. Bei einem high-end-Digitalrückteil, welches zurzeit rund 20.000 Euro kostet, bleibt demnach eine Sensorfläche im Wert von 8000 Euro ungenutzt.

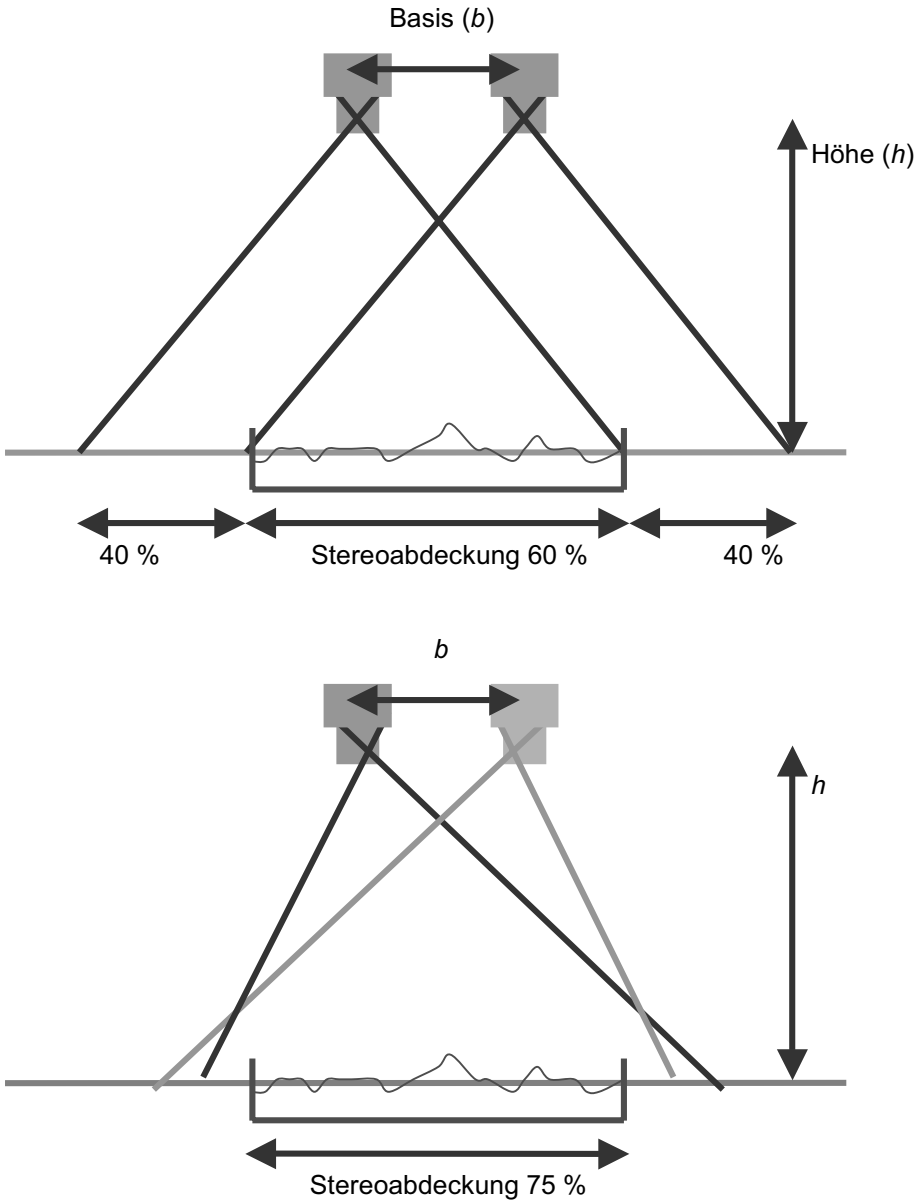


Abb. 1: Grafische Darstellung einer Flugplanung (Tabelle 1) im Zweibildfall ohne versetzte Hauptpunktlage (oben) und mit versetzter Hauptpunktlage (unten). Zahlenangaben in Prozent der Bildfläche des Sensors.

In Tabelle 1 sind Werte für eine Aufnahmeplanung aufgelistet. Die Aufnahmen werden wie in Abbildung 1 dargestellt aufgenommen. Das Objekt soll mit zwei Bildern stereoskopisch abgedeckt werden. Ein Pixel im Bild soll dabei maximal 1 mm^2 am Objekt abbilden. Rechnet man die Aufnahmeplanung für eine Kamera mit einem hochauflösenden Digitalrückteil mit 33 Megapixeln, werden alle Projektvorgaben erfüllt. Rechnet man die Aufnahmeplanung jedoch für die gleiche Kammer und einem Versatz der Hauptpunktlage um 8 mm, so stellt man fest, dass die Stereofläche größer ist, als im ersten Fall. An Stelle von 60 % Überlappung werden 75% bei gleich bleibendem Höhenbasisverhältnis erreicht. Der Sensor wird besser ausgenutzt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diese größere Stereofläche besser zu nutzen. Man kann zum Beispiel näher an das Objekt herangehen, um die Fläche stereoskopisch abzudecken, damit der Aufnahmemaßstab größer wird und mehr Details im Bild wiedergegeben werden. Wenn die Hauptpunktlage um 8 mm versetzt wird, kann man die Projektvorgaben auch mit einem Digitalrückteil mit „nur“ 22 Megapixeln erreichen (Tab. 1) und erreicht sogar eine bessere Auflösung als bei der Standardrechnung mit einem 33 Megapixel Rückteil. Ein solches 22 Megapixel Rückteil ist nicht nur erheblich günstiger als Rückteile mit noch mehr Pixeln, sondern besitzt auch größere Pixelabstände, da der Trend bei der Entwicklung digitaler Rückteile dazu tendiert, immer mehr Pixel auf der gleichen Sensorfläche unterzubringen. Ein größerer Pixelabstand stellt geringere Anforderungen an das Auflösungsvermögen des Objektivs und führt in der Regel zu einer besseren Bildqualität.

Tabelle 1: Aufnahmeplanung für Beispielprojekt und unterschiedlichen Aufnahmeszenarien. Die geforderte Auflösung pro Bildpixel soll < 1 mm sein.

	Konstante Höhe & Basis		**Maximale Überlappung**	
Digitalrückteil	Leaf Aptus 75	Leaf Aptus 75	Leaf Aptus 75	Leaf Aptus 22
Versatz der Hauptpunktlage	0 mm	8 mm	8 mm	8 mm
Geforderte Stereoabdeckung	1,3 × 2,3 m^2	1,3 × 2,3 m^2	1,3 × 2,3 m^2	1,3 × 2,3 m^2
Stereoüberlappung	60 %	75 %	**100 %**	**100 %**
Kammerkonstante	47 mm	47 mm	47 mm	47 mm
Sensor	36 × 48 mm^2	36 × 48 mm^2	36 × 48 mm^2	36 × 48 mm^2
Pixelanzahl	5040 × 6725	5040 × 6725	5040 × 6725	4008 × 5344
Pixelabstand	7 µm	7 µm	7 µm	9 µm
Maßstabszahl	55	55	36	36
Höhe	**2,6 m**	**2,6 m**	1,7 m	1,7 m
Basis	**0,8 m**	**0,8 m**	0,6 m	0,6 m
Auflösung	0,39 mm/Pixel	0,39 mm/Pixel	0,25 mm/Pixel	0,32 mm/Pixel

Beim Zweibildfall handelt es sich um einen Sonderfall, bei dem die Kamera zwischen den Aufnahmen gedreht werden muss, um die Vorteile der versetzten Hauptpunktlage nutzen zu können.

2.2 Mehrbildfall – terrestrisch

Für einen Streifen von Luftbildern wird eine versetzte Hauptpunktlage nur in Ausnahmefällen von Vorteil sein. Bei terrestrischen Anwendungen ist die versetzte Hauptpunktlage auch für Bildstreifen von Vorteil. Wenn hohe Gebäude, geologische Aufschlüsse oder ähnliche Objekte vom Boden aus aufgenommen werden sollen, teilt die Sichtlinie des Beobachters (Achse des Hauptpunktes) das Objekt in zwei unterschiedlich große Teile (Abb. 2), wenn die Sensorebene parallel zur Fassade ausgerichtet ist.

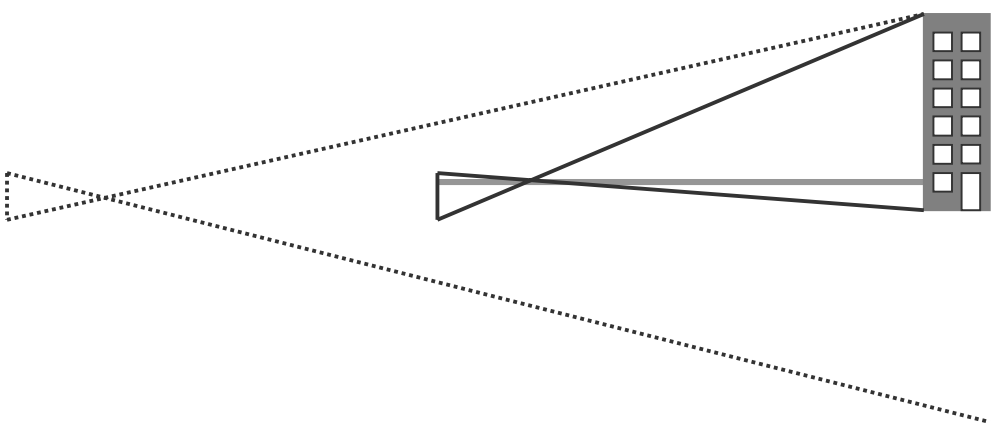


Abb. 2: Aufnahme von Gebäuden aus Bodennähe. Die Filmebene ist parallel zur Fassade ausgerichtet (nicht maßstabsgetreue Darstellung von Bild und Objektraum)

Diese asymmetrische Verteilung wird am besten von einer Kammer abgebildet, die auch eine asymmetrische Aufteilung der Bildseiten besitzt, beziehungsweise den Hauptpunkt nicht im Bildzentrum hat. Deshalb weisen terrestrische Messkammern meist einen Versatz der Hauptpunktlage auf. Ein Beispiel für eine solche Aufnahmeserie wird in Abbildung 3 gezeigt. Die horizontale Sichtlinie des Beobachters zeigt deutlich die asymmetrische Verteilung der Bildseiten (Abb. 2). Für die Aufnahmen musste die Kamera leicht gekippt werden, um den Aufschluss formatfüllend abzubilden. Mit versetzter Hauptpunktlage musste die Kamera in diesem Fall jedoch weit weniger geneigt werden als eine Kamera mit Hauptpunkt in der Bildmitte. Je stärker die Bildebene zur Objektebene des Aufschlusses bei der Aufnahme gekippt werden muss, desto stärker ändert sich der Maßstab mit zunehmender Objekthöhe. Wenn die Bildebene parallel zur Objektebene ausgerichtet werden soll, dann erlaubt die Kamera mit versetzter Hauptpunktlage eine kürzere Aufnahmedistanz und besitzt damit bei gleicher Brennweite einen größeren Maßstab – beziehungsweise mehr Detailreichtum (Abb. 2 u. 3).

Abb. 3: Aufnahmenstreifen eines geologischen Aufschlusses in Wolhusen (LU). Die Hauptpunktlage der Kamera war um 8 mm nach oben versetzt.

Das Arbeiten mit einer versetzten Hauptpunktlage bietet sich besonders für terrestrische Aufnahmen an. Ohne starkes Verkippen der Kamera können auch hohe Objekte ohne perspektivische Verzerrung erfasst werden. Die Sensorfläche wird dabei optimal ausgenutzt und die Kamera muss gar nicht oder nur leicht gekippt werden. Während diese Vorteile jedem Anwender einer terrestrischen Aufnahmekammer bekannt sind, existieren nur analoge Modelle solcher Kameras. Da heutzutage meist mit digitalen Kameras gearbeitet wird, die quasi ausschließlich eine zentrierte Hauptpunktlage besitzen, wird das Wissen aus der Zeit der terrestrischen Kammern kaum noch angewendet.

3 Digitale Kamera mit versetzter Hauptpunktlage

Um Aufnahmen mit dem Leaf Aptus Digitalrückteil (Tabelle 1) zu machen, muss ein Objektiv einen Bildkreis von 60 mm abdecken. Es muss zudem ein genügend hohes Auflösungsvermögen besitzen, damit auch bei 7 µm Pixelabstand ein optimales Bildergebnis garantiert ist. Nur wenige Objektive erfüllen diese Kriterien. Soll ein Objektiv zudem mit versetzter Hauptpunktlage an eine Kamera angesetzt werden, so muss der Bildkreis des Objektivs größer sein als der des Sensors.

Das Schneider Apo Digitar 5,6/47 mm (Abb. 4) besitzt einen maximalen Bildkreis von 113 mm und bietet damit genügend „Spielraum“, um es für Aufnahmen mit einem Sensor mit 60 mm Bildkreis auch mit versetzter Hauptpunktlage zu benutzen. Selbst bei einer Dezentrierung um 31 mm würde der Sensor noch voll abgedeckt. Der Hauptpunkt läge in diesem Fall außerhalb des Sensors! Die Auflösung des Objektivs entspricht den Anforderungen, welche digitale Sensoren an ein Objektiv stellen.

Die Weitwinkeltauglichkeit eines Digitalsensors ist von besonderer Bedeutung, wenn man die Hauptpunktlage eines Objektivs verschiebt. Während sich der effektive Aufnahmewin-

kel einer Bildseite verkleinert, vergrößert sich der Bildwinkel der anderen Seite (Abb. 2). Gerade bei Weitwinkelobjektiven kann diese Vergrößerung des Bildwinkels zu einer Abnahme der Bildqualität führen. Deshalb ist es besonders wichtig, eine Sensor-Objektiv-Kombination zu finden, bei der eine optimale Bildqualität auch bei extremen Aufnahmewinkeln gegeben ist. Tests mit dem Schneider Apo Digitar 5,6/47 mm haben gezeigt, dass die Bildqualität auch bei einem Verschieben der Hauptpunktlage um 14 mm an einer ALPA 12 SWA sehr gut mit dem Leaf Aptus Sensor harmoniert.

Abb. 4: Schneider Apo Digitar 5,6/47 mm montiert auf einer ALPA-Objektivplatte mit einer um 8 mm versetzten Hauptpunktlage (links). ALPA 12 WA mit Leaf Aptus 75, Apo Digitar und Verschlusssteuergerät (rechts)

Das Objektiv wird von der Firma ALPA of Switzerland mit einem festen Versatz der Hauptpunktlage von 8 mm angeboten. Die feste Verschiebung der Hauptpunktlage hat gegenüber einer kontinuierlichen Verstellung der Hauptpunktlage über einen Feintrieb (Shiftkamera/Shiftobjektiv) den Vorteil, dass sie mechanisch stabiler ist. Ein Versatz von 8 mm führt bei digitalen Sensoren mit Seitenlängen von 36 × 48 mm^2 bereits zu beachtlichen Ergebnissen. Das Objektiv kann dabei so an die ALPA angesetzt werden, dass der Versatz entweder auf die kurze oder die lange Sensorseite angewendet wird.

Objektive lassen sich auf den ALPA Objektivplatten maximal um 8 mm dezentrieren (fixer Versatz). ALPA hat Objektive ab 35 mm Brennweite im Programm, die sich um diesen Betrag dezentrieren lassen und für die digitale Fotografie geeignet sind. Kleinere Versatzdistanzen sind ebenfalls möglich. Soll die Hauptpunktlage noch weiter verschoben werden, so finden sich Kameras mit kontinuierlicher Shifteinstellung im Programm. Damit bietet ALPA ein umfangreiches Programm an Kameras und Objektiven an, mit denen man die Hauptpunktlage verschieben kann. Einen Überblick zum ALPA-System und zum Genauigkeitspotenzial einer ALPA 12 WA-Kamera mit einem 22 Megapixel Digitalrückteil findet sich bei RIEKE-ZAPP et al. (2005).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zweibildfall und für terrestrische Anwendungen kann durch den Versatz der Hauptpunklage die Ausnutzung des Bildsensors und die Stereoabdeckung im Objektraum verbessert werden. Eine optimale Bildqualität von digitalen Aufnahmesystemen kann nur erreicht werden, wenn alle Komponenten der Aufnahmekette zusammen harmonieren. Bei einem Versatz der Hauptpunklage wird an einer Seite des Sensors ein extremer Bildwinkel erzeugt. Die Bildqualität muss vor dem Einsatz des Systems für Projektaufträge getestet werden.

Die Vorteile bei der Aufnahmeplanung ergeben sich bereits bei der Aufnahmeplanung (Tab. 1). Für die digitale Photogrammetrie ist zudem wichtig, dass hochauflösende Sensoren, welche die größten Hardwarekosten erzeugen, bei optimaler Ausnutzung von Sensoren mit geringerer Auflösung ersetzt werden können. Da Sensoren mit geringerer Auflösung häufig einen größeren Pixelabstand besitzen als die hochauflösenden Sensoren (Tab. 1), ergibt sich nicht nur eine Kostenersparnis, sondern meist auch eine bessere Bildqualität.

Da man für photogrammetrische Anwendungen möglichst mit einer stabilen Hauptpunktlage arbeiten möchte, muss für solche Anwendungen ein neues Objektiv angeschafft und kalibriert werden. Diese Extrakosten können dadurch kompensiert werden, dass vorhandene Sensoren mit geringerer Auflösung durch optimale Ausnutzung der Sensorfläche über längere Zeiträume eingesetzt werden können. ALPA of Switzerland bietet eine Reihe von Lösungen an, um digitale Photogrammetrie mit versetzter Hauptpunktlage zu betreiben. Am Institut für Geologie der Universität Bern laufen zurzeit mehrere Projekte, bei denen die Vorteile der versetzten Hauptpunktlage ausgenutzt werden.

5 Danksagung

ALPA of Switzerland wird für die Bereitstellung von Kameras und Digitalrückteilen gedankt.

Literatur

Albertz, J. &W. Kreiling (1989): *Photogrammetrisches Taschenbuch.* 4. Auflage. Herbert Wichmann, Karlsruhe. 292 S.

Krauss, K. (1993): *Photogrammetry. Volume 1. Fundamentals and Standard Processes*. Dümmler, Bonn. 397 S.

Luhmann, T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 571 S.

Meydenbauer, A. (1912): *Handbuch der Messbildkunst.* Wilhelm Knapp, Halle aS. 245 S.

Rieke-Zapp, D., Oldani, A. & J. Peipe (2005): *Eine neue hochauflösende Mittelformatkamera für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie*. Publikationen der DGPF, 14. 263-270

Photogrammetrie zur Deformations- und Rissanalyse bei textilbewehrten Betonbauteilen – Anwendung und Auswerteverfahren

Johannes LANGE, Wilhelm BENNING und Jörg PETERS

Zusammenfassung

Die Rissentwicklung bei Betonbauteilen lässt sich mittels photogrammetrischer Messtechnik ermitteln. Vorgestellt wird ein System basierend auf der Auswertesoftware PHIDIAS.

Die Bildzuordnung der photogrammetrischen Messung kann über ein nummeriertes Messmarkenraster oder über Zuordnungsverfahren wie z. B. Korrelation und Kleinste-Quadrate-Anpassung durchgeführt werden. Da die Verfahren bei der Auswertung jeweils einen Ausschnitt im Bild benötigen, können Ergebnisse in der Nähe von Rissen verfälscht werden. Speziell die Kleinste-Quadrate-Anpassung wird in diesem Zusammenhang diskutiert.

1 Einleitung

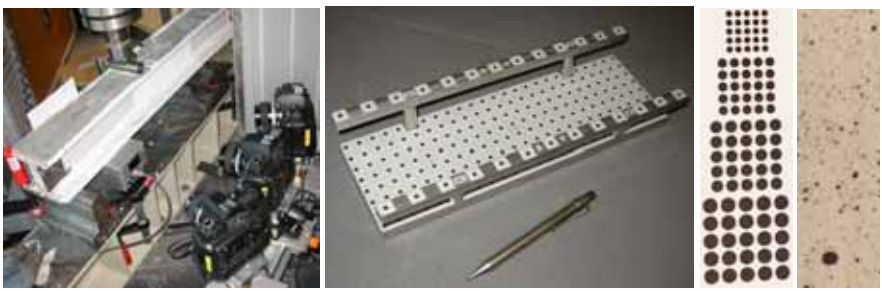
Beton ist ein komplexer Verbundwerkstoff, dessen Hauptanteile eine spröde Betonmatrix und eine dehnbare (duktile) Bewehrung (Stahl oder Textilfasern) sind. Wird bei Belastung die verhältnismäßig geringe Zugfestigkeit der Betonmatrix überschritten, entsteht ein Riss, in welchem die Zugbelastung vollständig durch die Bewehrung aufgenommen wird. Durch die Kenntnis der Risse lassen sich daher Rückschlüsse auf das Bauteilverhalten ziehen und eine Bemessung durchführen. Die Photogrammetrie, kombiniert mit einer Deformationsanalyse, ermöglicht eine flächenhafte Risserkennung auf der Oberfläche des Bauteils und erlaubt Detailuntersuchungen, wie z. B. Rissbreitenbestimmung.

Im Folgenden wird zunächst die verwendete photogrammetrische Messtechnik vorgestellt, die im Sonderforschungsbereich 532 „Textilbewehrter Beton“ an der RWTH Aachen (SFB 532) entwickelt wurde. Danach wird das Zuordnungsverfahren „Kleinste-Quadrate-Anpassung“ (Least Square Matching, im Folgenden: LSM) bei der Verwendung im Rissbereich untersucht und seine Anwendbarkeit bei der Risserkennung diskutiert.

2 Photogrammetrisches Messsystem

Mit Photogrammetrie bezeichnet man das Verfahren, aus Fotoaufnahmen ein Objekt zu rekonstruieren. Das von den Autoren vorgestellte photogrammetrische Messsystem besteht aus drei hochauflösenden, digitalen Kameras (Kodak DCS Pro 14n). Diese bilden aus unterschiedlichen Richtungen die Oberfläche eines Betonversuchskörpers bei steigender Belastung ab (Abb. 1a). Vorab werden die Kameras mittels eines Kalibrierkörpers (Abb. 1b) in einer Bündelausgleichung orientiert. Als Auswertesoftware wird PHIDIAS auf der CAD-Oberfläche MicroStation verwendet (BENNING & SCHWERMANN 1997). Üblicherweise wird

für die Markierung der Bauteile ein Raster aus kreisrunden Messmarken eingesetzt (Abb. 1c), Beispiele dieser Messungen finden sich in LANGE, BENNING & SCHWERMANN (2004). Für die folgenden Ausführungen jedoch wird die Bauteiloberfläche mit einem Zufallsmuster (Specklemuster) markiert (Abb. 1d).



a) b) c) d)

Abb. 1: a) Versuchsaufbau, b) Kalibrierkörper, c) Punktraster (Punktdurchmesser 2–5 mm, Abstand > 1 mm), d) Specklemuster

3 Deformations- und Rissanalyse

3.1 Verhalten von Betonbauteilen unter Belastung

Im Massivbau (Betonbau) werden Bauteilversuche zur Erfassung von Betonparametern durchgeführt. Abbildung 1a zeigt beispielsweise einen Drei-Punkt-Biegeversuch, dessen Schubfeld photogrammetrisch aufgenommen wird. Ziel ist die Messung der Entwicklung von Deformationen, Rissbildern und Rissöffnungen während der Belastung.

Gemessene Verschiebungen bei Bauteilversuchen setzen sich aus einer globalen Verschiebung des Bauteils relativ zu den Messkameras und aus der Deformation des Körpers, wie z. B. der Durchbiegung eines Trägers, zusammen. Letztere teilt sich wiederum in Betondehnungen und Risse auf. Die relativen Verschiebungen fallen durch ein Objekt-fixes Koordinatensystem aus der Betrachtung. Risse haben bei Betonbauteilen größenordnungsmäßig mit einer Rissbreite von 0,02 mm bis weit über 0,1 mm einen wesentlich größeren Deformationsanteil als die Betondehnung, die maximal 1–2 Promille erreicht (Abb. 2), d. h. eine Dehnung von unter 0,02 mm zwischen zwei Rissen aufweist.

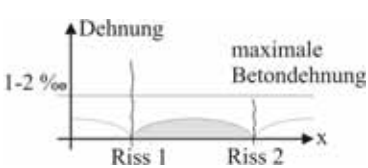


Abb. 2: Betondehnung zwischen zwei Rissen

Im Folgenden werden die Verschiebungsänderungen zwischen zwei Laststufen durch affine Abbildung mittels der Kleinste-Quadrate-Anpassung ermittelt. Dabei werden nicht-affine

Anteile der nicht-linearen Betondehnung vernachlässigt. Diese Anteile sind klein, da die Betondehnung selbst klein ist und sich außerdem nach der abgeschlossenen Rissbildung nicht weiter ändert.

3.2 Kleinste-Quadrate-Anpassung (Least Square Matching, LSM)

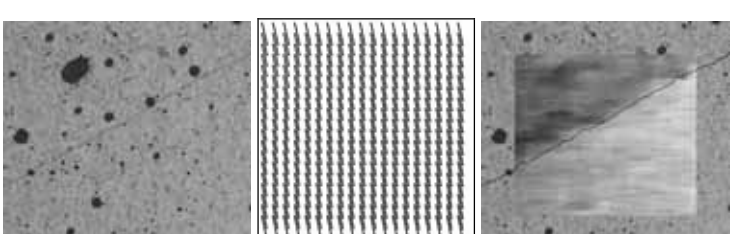
Die Kleinste-Quadrate-Anpassung (LSM) passt ein Suchbild einem Musterbild an, indem iterativ die Parameter einer Transformation (z. B.: affin oder projektiv) durch die Minimierung der Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen optimiert werden.

Das Verfahren wurde in den 1980er-Jahren von ACKERMANN (1983), FÖRSTNER (1985) und GRÜN (1985) in der Bildverarbeitung eingeführt und ist heute neben Korrelationsverfahren als Bildzuordnungsverfahren etabliert. Eine genaue Beschreibung ist der einschlägigen Literatur zu entnehmen (LUHMANN 2003).

3.3 Näherungswerte und Rasterauswertung

Näherungswerte sind für das LSM grundlegend, da einerseits eine grobe Näherung als Startwert für das iterative Verfahren notwendig ist und andererseits die Konvergenz und Effizienz durch gute Näherungswerte erhöht werden. Als automatische Verfahren zur Ermittlung von Näherungswerten nennt LUHMANN (2003) Interestoperatoren, die markante Bildstellen extrahieren und zuordnen. Alternativ lässt sich eine vorhandene LSM-Implementation verwenden. Aus dem Musterbild wird ein beliebiger Ausschnitt gewählt und im Suchbild als Startausschnitt verwendet. Dabei werden der Startausschnitt auf einem Raster verschoben und gleichzeitig die Anzahl der Iterationen und die Fehlerquadratsumme der Grauwerte zwischen Such- und Musterbild begrenzt. Erfolgt der Abbruch durch Überschreiten der Schranke der Grauwertdifferenz, werden die an diesem Rasterpunkt ermittelten affinen Parameter für eine flächenhafte Auswertung als Näherungswerte eingesetzt.

In der eigentlichen Auswertung werden ein Raster über das Musterbild gelegt, daraus Ausschnitte ermittelt und diese nach der Transformation um die Näherungswerte an das Suchbild mittels LSM angepasst. Abb. 3a zeigt das Suchbild, Abb. 3b die ermittelten Verschiebungen eines groben Rasters und Abb. 3c zeigt als normiertes Graustufenbild die Verschiebung in x-Richtung. Der Einfluss des Risses als diskreter Sprung ist ersichtlich.



a) b) c)

Abb. 3: a) Specklebild (Suchbild), b) Verschiebungsfeld (grobes Raster), c) Verschiebung in x- Richtung (normierte Graustufen)

3.4 LSM im Bereich von Rissen

Aus der Betrachtung des letzten Kapitels entsteht die Fragestellung nach dem Einfluss eines diskreten Sprungs (Riss) im Suchbild auf das LSM-Verfahren. Wie reagiert die Optimierung affiner Parameter bei der Anwendung auf einen nicht-affinen Bereich?

Der Einflussbereich des Risses auf das ermittelte Verschiebungsfeld ist von der Größe des gewählten Ausschnitts im Musterbild und von seiner Transformation im Suchbild abhängig. Die Form des Risses selber ist skaleninvariant (MANDELBROT 1991) und daher in keiner Ausschnittsgröße funktional darstellbar.

In der folgenden theoretischen Betrachtung wird der Riss vereinfacht als senkrecht angenommen. Er teilt das Bauteil in zwei Bereiche mit unterschiedlichen, aber jeweils konstanten und waagerechten Verschiebungen β_1 und β_2. Das lokale Startfenster des LSM läuft parallel zu den Verschiebungen über den Riss und wird dort in die Flächen A_1 und A_2 bzw. den zugehörigen Pixelanzahlen n_1 und n_2 aufgeteilt (Abb. 4).

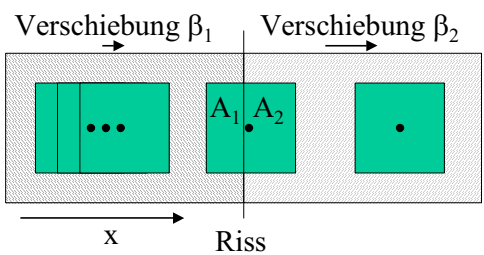


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des LSM bei der Messung über einem Riss

Wird der Riss vom Startausschnitt nicht berührt, ermittelt das LSM die Verschiebung β_1 links bzw. β_2 rechts vom Riss. Teilt der Riss das Startfenster, ergibt sich das folgende Optimierungsproblem:

$$\Sigma(f(x)-g(x-\beta))^2 = \Sigma_1(f(x)-g(x-\beta))^2 + \Sigma_2(f(x)-g(x-\beta))^2 \rightarrow Min \qquad (1)$$

Zu minimieren sind die Summen der Quadrate der Grauwertdifferenzen auf beiden Rissseiten. Hierbei wird die Notation von LUHMANN (2003) verwendet, bei der f(x, y) die Funktion der Grauwerte des Musterbilds und g(x, y) des Suchbilds sind. Die Bewegung in y-Richtung wird wegen der Beschränkung auf die Bewegung in x-Richtung nicht weiter betrachtet.

Die Lösung des Optimierungsproblems Gleichung (1) ist wegen der nicht-linearen Bildfunktion geschlossen nicht möglich. Werden die Bildfunktionen jedoch als lineare Funktionen f(x) und g(x) angenommen, sind auch die Differenzen der Grauwerte in jedem Pixel linear und nur abhängig von der Lage zum Riss.

Gleichung (1) vereinfacht sich also zu einem linearen Optimierungsproblem:

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 = \Sigma_1 c_1^2 (\beta - \beta_1)^2 + \Sigma_2 c_2^2 (\beta - \beta_2)^2 = n_1 (\beta - \beta_1)^2 + n_2 (\beta - \beta_2)^2 \quad (2)$$

Die Parameter c_1 und c_2 stellen die radiometrische Skalierung der Grauwerte dar und werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die Anzahl der Pixel im Messfenster ist n, aufgeteilt auf die beiden Flächen n_1 und n_2 auf den Rissseiten.

Wird das Optimierungsproblem über die Normalengleichungen gelöst, entsteht folgender Term:

$$\beta = \frac{1}{n} (n \cdot \beta_2 + (\beta_1 - \beta_2) \cdot n_1) \quad (3)$$

Es lässt sich aus Gleichung (3) erkennen, dass die Verschiebung direkt von der Flächenverteilung abhängt. Abb. 5 zeigt den stückweise linearen Verschiebungsverlauf bei einem senkrechten Riss. Aus der gleichen Überlegung folgt, dass bei Rissneigung der Verlauf im Rissbereich linear und im Übergangsbereich quadratisch ist.

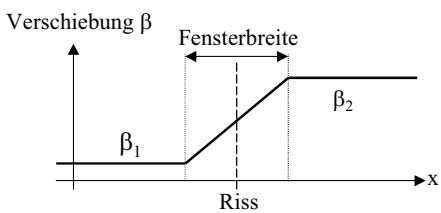


Abb. 5: Darstellung der Verschiebung und Messung über einen Riss

Die durch einen Riss verursachte geringe Verschiebungsdifferenz wird als verrauschte Rampe dargestellt (Abb. 3c). Daher wird für die Risserkennung die Untersuchung der Qualität der Anpassung vorgeschlagen.

3.5 Risserkennung mittels LSM

Die Qualität der erreichten Anpassung wird üblicherweise über die Differenz der Grauwerte aus Musterbild f(x, y) und Suchbild g(x, y) ermittelt:

$$v_i = (f_i(x,y) - g_i(x,y)) \quad (4)$$

Wird Σv_i^2 als Abbruchkriterium der Iteration des LSM vorgegeben, lässt sich aus der Anzahl der benötigten Iterationen bis zum Unterschreiten dieses Grenzwertes ein Wert für die Übereinstimmung zwischen Muster- und Suchbild ermitteln. Abb. 6 zeigt die Anzahl der Iterationen als Grauwertverteilung um einen Riss. Hierbei ist zu beachten, dass die Anzahl der benötigten Iterationen auch von den Näherungswerten abhängt, sich aber nicht sprunghaft ändert.
Der Durchmesser des durch den Riss beeinflussten Korridors ist von dem Untersuchungsausschnitt abhängig. Er entspricht der Einhüllenden der kumulierten Rechteckabtastung. Eine Risserkennung mittels Schwellwert- und Thinningverfahren ist hier denkbar.

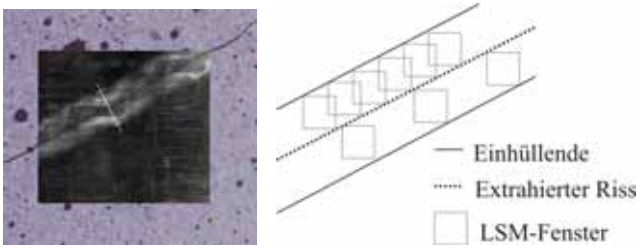


Abb. 6: Qualitätsdarstellung des LSM; Ermittlung der Breite des Korridors

4 Allgemeines und Dank

Der Sonderforschungsbereich 532 „Textilbewehrter Beton“ sowie das Teilprojekt „Photogrammetrische Deformationsmessung“ werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert.

Literatur

Ackermann, F. (1983): *High precision digital image correlation.* 39. Photogrammetrische Woche, Stuttgart

Benning, W. & R. Schwermann (1997): *PHIDIAS-MS – Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsanwendungen*. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, Heft 1

Deuflhard, P. (2004): *Newton Methods for Nonlinear Problems, Affine Invariance and Adaptive Algorithms.* Springer Series in Computational Mathematics, Springer

Förstner, W. (1985): *Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder.* 40. Photogrammetrische Woche, Stuttgart

Grün, A. (1985): *Adaptive least squares correlation – a powerful image matching technique.* In: South African journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14 (3). 175-187

Lange, J., Benning, W. & R. Schwermann (2004): *Photogrammetrische Deformationsmessung zur Rissanalyse bei Betonbauteilen*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 287-294

Luhmann, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie*. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. überarbeitete Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Mandelbrot, B. B.(1991): *Die fraktale Geometrie der Natur*. Birkhäuserverlag, Basel

SFB532: Sonderforschungsbereich 532 „*Textilbewehrter Beton“* an der RWTH Aachen, Server des SFBs, abzurufen unter: http://sfb532.rwth-aachen.de

Phototachymetrie – eine Methode zur Bauwerksmodellierung

Michael SCHERER

1 Hintergrund

Nicht nur Laserscannen und Photogrammetrie weisen erstaunliche Innovationen auf, auch die Tachymetrie. Hier gibt die Integration mit Elementen der Photogrammetrie auf zweierlei Weise entscheidende Impulse: einerseits durch die Integration von Kameras in die Totalstation (JURETZKO 2005, WALSER 2005, TOPCON 2005), andererseits durch eine softwaremäßig äußerst enge Einbindung externer Bilder in den Messprozess. Diese Synthese ermöglicht ein neues Messkonzept und rechtfertigt die Wortschöpfung „Phototachymetrie".

1.1 Motivation

Verschiedene Gründe führten dazu, eine neue, preiswerte Methode zur Bauwerksmodellierung und -visualisierung zu entwickeln:

- Der Bedarf an photorealistisch texturierten Modellen wächst. Die Phototachymetrie bietet neben dem Laserscannen und der Photogrammetrie eine in sich geschlossene Methode mit anderen, neuen Möglichkeiten.
- Das Instrumentarium, um Phototachymetrie zu betreiben, ist weit verbreitet; so entstehen nur marginale Investitionskosten.
- Die Photo-, Video- bzw. IATS-Totalstation (Image Assisted Total Station) als Weiterentwicklung der Totalstation ist im kommerziellen Gerätebau auf dem Vormarsch. Ein derartiges Instrument ist prädestiniert für die Phototachymetrie.
- Die Aufnahme von Digitalbildern ist sehr einfach, sodass es evtl. sogar lohnend sein kann, auch wenn nur Geometrie, also kein texturiertes Modell, gefordert ist, die Geometrie über Bilder zu extrahieren.
- Bauwerksaufnahme zur Bauanalyse und Baudokumentation in der Bauforschung erfordert sukzessive Messung vor Ort, dies ermöglicht allein die Phototachymetrie.
- Wenn die Software entsprechend gestaltet wird, benötigt man kein Spezialwissen.

1.2 Charakteristika der Phototachymetrie

Photogrammetrie und Laserscannen kann man als passive Aufnahmemethoden charakterisieren: Das Objekt wird erfasst, man beschäftigt sich damit erst im Zuge der Auswertung. Hardware und Software kommen getrennt zum Einsatz. Dem gegenüber ist die Phototachymetrie ein aktives Verfahren: Am Objekt orientiert verlangt sie die Interaktion zwischen Aufnahmeobjekt, Beobachter und Instrumentarium. Kennzeichnend ist eine enge Verzahnung von Software und Hardware. Um Bauwerke phototachymetrisch aufzunehmen, benötigt man als Standardgeräte neben dem Notebook zur Steuerung nur eine motorisierte Totalstation und eine Digitalkamera (Abb. 1 links).

Die folgenden Eigenschaften charakterisieren die Phototachymetrie:

- Weitgehend automatischer Ablauf
- Alle Schritte vor Ort möglich
- Ergebnisse erhält man sofort
- Die Handhabung ist sehr einfach
- Genauigkeit ständig überprüfbar
- Vollständigkeitskontrolle
- Vorzügliche Anpassung an wechselnde Erfordernisse, z. B. an unterschiedliche Bauwerkseigenschaften oder entsprechende Wünsche an die Resultate
- Das Instrumentarium ist vergleichsweise preiswert.

Phototachymetrie wird hier aber auch mit dem Blick auf den Wandel und die Erweiterung in der Instrumententechnik bei den Totalstationen vorgestellt: Die Totalstation mit integrierter Bilderfassung ist nicht mehr nur Prototyp (SCHERER 2004), sondern – in bescheidenen Ansätzen – bereits kommerziell erhältlich (Abb. 1 rechts). Dieser Gerätetyp wird – weiter perfektioniert – den Einsatz der Phototachymetrie voranbringen.

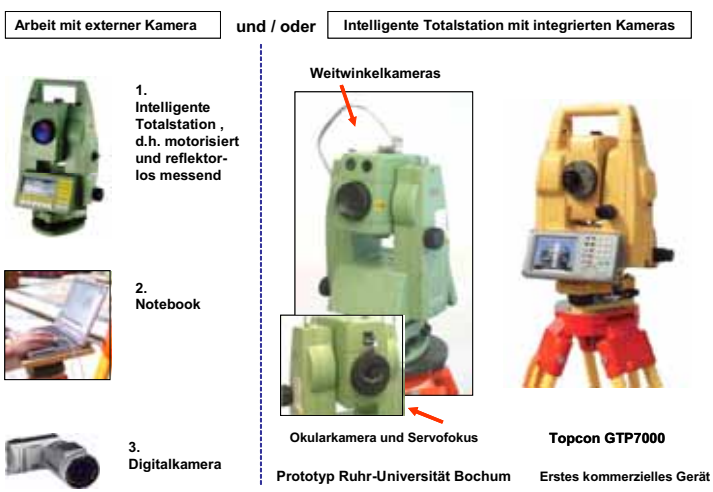


Abb. 1: Hardware für die Phototachymetrie

2 Phototachymetrie

2.1 Funktionsprinzip

Durch ständig wechselndes Zusammenspiel zwischen photographischer Aufnahme und tachymetrischer Messung unter Einbeziehung von Automationsschritten erlaubt die Methode die gleichzeitige Erfassung von Geometrie *und* texturiertem Bild (Orthophoto), wahlweise aber auch die alleinige Erfassung der Geometrie.

Einerseits hat man die Interaktion zwischen Beobachter, Objekt und Instrumentarium, und andererseits Steuerungsmechanismen, die auf den Möglichkeiten des intelligenten Scannens beruhen (SCHERER 2004): Berechnung einer Punktposition am Objekt → Gerätesteuerung zum berechneten Punkt → Messung der Ist-Position → Berechnung … Im Folgenden wird die Funktionsweise an einem einfachen Beispiel exemplarisch erläutert.

Das Objekt wird mit der Digitalkamera photographiert – kein Bildverband mit großer Überdeckung, sondern jede Oberfläche mindestens einmal gut getroffen. Die Bilder werden ins Notebook übertragen. Voraussetzung zur Interaktion zwischen Bild und Totalstation ist die Bestimmung der äußeren Orientierung, also die Verknüpfung über drei oder mehr Bildpunkte. Die tachymetrische Koordinatenbestimmung und die Zuordnung zu Bildpunkten erfolgen Zug um Zug, sodass die zeitversetzte Identifizierung bzw. Referenzierung entfällt (Abb. 2).

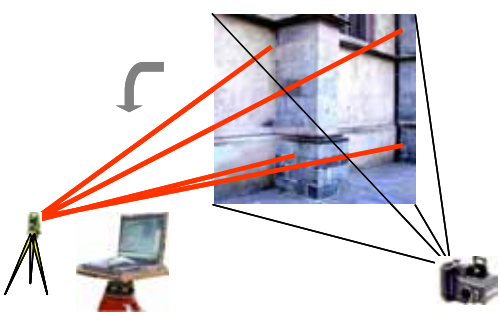


Abb. 2: Parametrische Orientierung

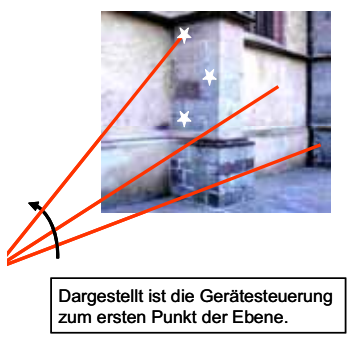


Abb. 3: Autom. Messstrahlsteuerung

Nun folgen die für die Phototachymetrie typischen Interaktionen: Hat man, wie in diesem einfachen Beispiel (Abb. 3) ein Bauwerk mit ebenen Oberflächen, so lässt sich die Ebenengleichung über drei Punkte bestimmen. Zu deren tachymetrischer Messung werden im orientierten Bild nacheinander drei Punkte mit dem Cursor bezeichnet. Nach dem ersten Klick ins Bild bewegt sich die Totalstation so, dass in wenigen vollautomatisch ablaufenden Schritten der Messfleck von seiner momentanen Position (rechts) zu der im Bild bezeichneten Stelle am Objekt geführt wird. Die Ebenenbestimmung läuft also automatisch ab. Anschließend werden Abgrenzungen oder Ausschnitte innerhalb dieser Ebene allein durch den Klick auf die entsprechenden Ecken im Bild ermittelt: Aus dem orientierten Bild wird die entsprechende Richtung mit der tachymetrisch bestimmten Ebene zum Schnitt gebracht. Als Resultat hat man die Koordinaten der Ecke und, wenn die Fläche sukzessive polygonal umfahren wird, auch die entsprechende Flächentextur (Abb. 4). Zur Fortführung der Arbeiten nutzt man alle bereits vorliegenden Kenntnisse: Übertragung der Parameter auf parallele und senkrechte Ebenen, Nutzung von Punkten, die bereits als Eckpunkte von Flächen bestimmt sind, als Umgrenzungspolygonpunkte für angrenzende Flächen ebenso wie entsprechend schneller Aufbau einer Dreiecksvermaschung.

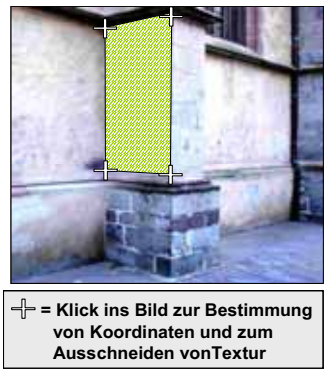


Abb. 4: Alle Arbeit am Notebook

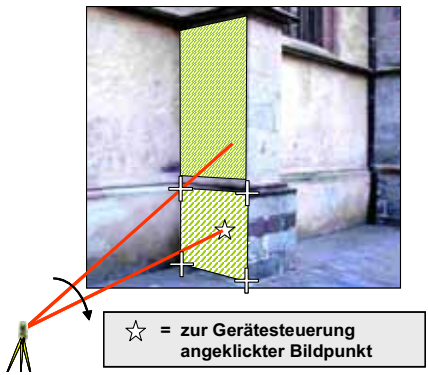


Abb. 5: Messstrahlsteuerung/Umfahrung

Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für den Fortgang der Arbeit mit Parallelebenen: Ein einziger Klick ins Bild → die Totalstation bewegt den Messstrahl an die entsprechende Objektposition → Messung → Koordinatenbestimmung und Bestimmung der neuen Parallelebene → Anklicken der Flächenumgrenzung im Bild. Als Resultat liegen die Geometrie der Ecken sowie die Textur für die Visualisierung vor.

2.2 Ungeahnte Möglichkeiten

Die Phototachymetrie weist einen hohen Grad an Redundanz auf, bedingt durch die Kombination tachymetrischer und photogrammetrischer Informationen und durch die Rückkopplung im „Regelkreis“ (Messung – Berechnung – Steuerung – Messung …). Diese Redundanz ist die Quelle für eine Vielzahl von Kombinationen im praktischen Einsatz, einiges erst angedacht und nur rudimentär erprobt. Sie wird genutzt

- zur Aufdeckung von Fehlern,
- zur Optimierung des Messprozesses und
- zur spannungsfreien gegenseitigen Anpassung von Bild und Geometrie.

Abbildung 6 zeigt die unterschiedlichen Wege zur Koordinatenbestimmung. Ein Grundprinzip besteht darin, die Regelfläche, also Ebene, Zylinder usw. tachymetrisch zu bestimmen, den jeweiligen Punkt auf dieser Regelfläche hingegen aus dem Bild zu entnehmen, also den Bildstrahl mit dem Objekt zu schneiden. Auch kann man Regelflächen miteinander verschneiden (Schnitt von zwei Ebenen zur Kanten- und von drei Ebenen zur Eckenbestimmung).

Auch die Einbringung der Bildinformation kann unterschiedlich erfolgen. Sinnvoll, aber nicht zwingend ist es, das ganze Objekt zunächst photographisch zu erfassen. Dieser Bildverband mit meist geringer Überdeckung ist im Zuge der Aufnahme nach und nach, Bild für Bild, parametrisch zu orientieren. Wenn möglich, kann die Vielzahl von Einzelbildern bezüglich einiger weniger grober Übersichtsbilder vororientiert werden, sodass bei der späteren Arbeit die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Bildern bereits hergestellt sind.

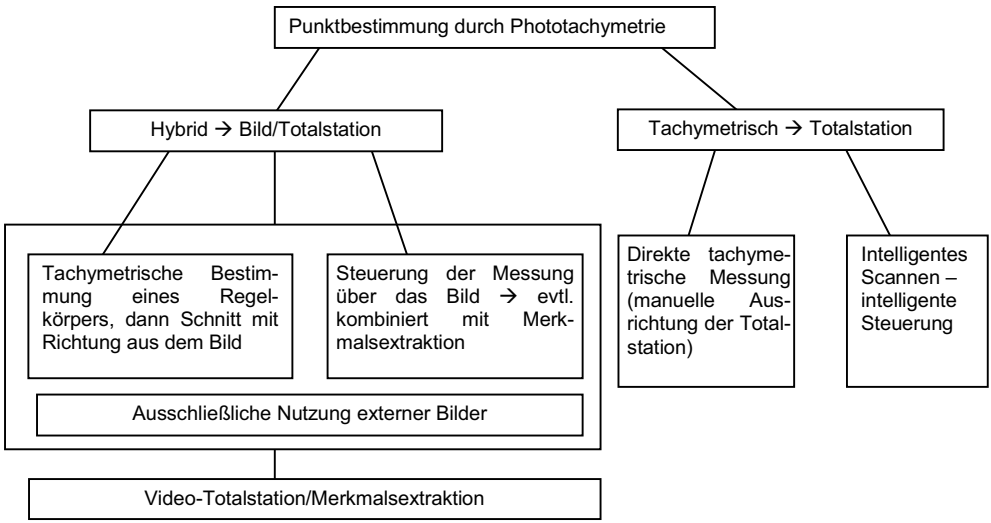

Punktbestimmung durch Phototachymetrie
Hybrid → Bild/Totalstation
Tachymetrisch → Totalstation
Tachymetrische Bestimmung eines Regelkörpers, dann Schnitt mit Richtung aus dem Bild
Steuerung der Messung über das Bild → evtl. kombiniert mit Merkmalsextraktion
Direkte tachymetrische Messung (manuelle Ausrichtung der Totalstation)
Intelligentes Scannen – intelligente Steuerung
Ausschließliche Nutzung externer Bilder
Video-Totalstation/Merkmalsextraktion

Abb. 6: Verfahren zur Koordinatenbestimmung

Bei der fortlaufenden Bearbeitung des Bildbereiches hat man stets eine große Anzahl von bereits bekannten Punkten, sodass der Aufwand der Messung (in aller Regel ohnehin nur die Messung durch Anklicken im Bild) sehr minimiert wird. Einfache Algorithmen beim Bildwechsel sind denkbar, denn es lässt sich jedes orientierte Bild automatisch mit der grafisch-alphanumerischen Darstellung der bereits gemessenen Situation überlagern. Denkbar ist auch die Kombination von bereits erstelltem texturiertem 3D-Modell und Projektion des Bildes in dieses Modell mit der Absicht, Anpassungen und Modellierungen im zweidimensionalen Bild anhand der bereits vorhandenen dreidimensionalen, virtuellen Realität zu erleichtern und zu vereinfachen.

Es ist generell vorab zu klären, wie mit Spannungen zwischen Bild und Geometrie umgegangen wird. Denn insbesondere bei der Aufnahme mit besseren Amateurkameras treten Abweichungen z. B. durch Restverzeichnung auf. Sofern diese und andere (s. Kap. 3) nicht beseitigt werden können, ist über ihre Verteilung zu entscheiden.

Bezüglich Nutzung und Beseitigung der Redundanz des hohen Informationsgehaltes von Bild und Geometrie sind in Abbildung 7 zwei gegensätzliche Verfahrensweisen aufgezeigt, wobei links die Geometrie dem Bild angepasst wird, wohingegen im rechten Teil des Schemas umgekehrt verfahren ist. Auch Zwischenlösungen sind denkbar. Leitet man Koordinaten über die Bildrichtung her (Schnitt mit der tachymetrisch bestimmten Regelfläche), so hat man ein widerspruchsfreies 3D-Modell mit photorealistischer Textur, wobei die Geometrie aber nicht allen Ansprüchen genügen mag. Das Verfahren ist einfach und schnell handhabbar. Wird hingegen auf exakte Geometrie Wert gelegt (s. Abb. 7 rechts), dann ist eventuell das Bild zu verformen, damit es keine sichtbaren Abweichungen gibt. Zuvor muss allerdings die Geometrie an verschiedenen Stellen überprüft werden, was automatisch oder halbautomatisch dadurch geschehen kann, dass das Resultat einer Kantenextraktion aus dem Bild verglichen wird mit einer Kantenbestimmung durch direkte Messung oder durch automatisch schrittweises Scannen quer zur Kante. Im Anschluss an die Erstel-

lung der genauen Geometrie ist die Bildtextur in den jeweiligen polynomialen Umfang einzupassen, also zu stretchen. Untersuchungen darüber, wie die Schritte bei Beibehaltung exakter Geometrie praxisnah realisiert werden können, liegen noch nicht vor. Der Ablauf kann aber automatisch erfolgen.

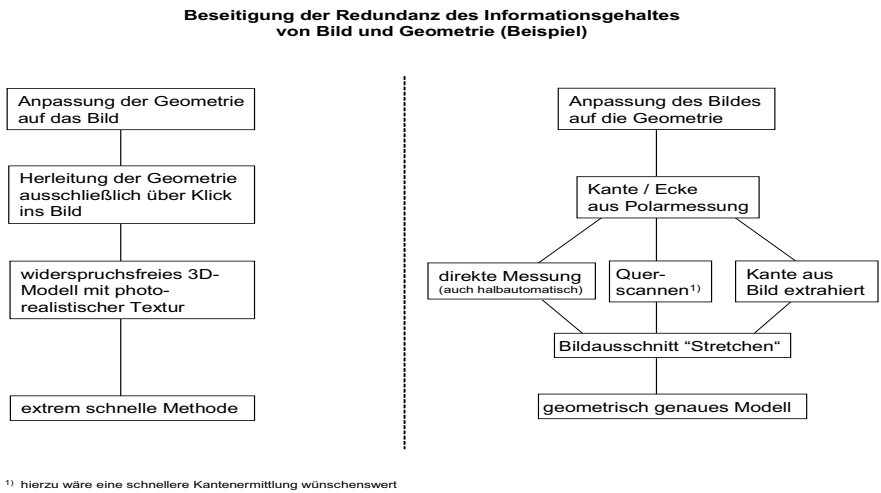

Beseitigung der Redundanz des Informationsgehaltes
von Bild und Geometrie (Beispiel)
Anpassung der Geometrie auf das Bild
Herleitung der Geometrie ausschließlich über Klick ins Bild
widerspruchsfreies 3D-Modell mit photo-realistischer Textur
extrem schnelle Methode
Anpassung des Bildes auf die Geometrie
Kante / Ecke aus Polarmessung
direkte Messung (auch halbautomatisch)
Quer-scannen1)
Kante aus Bild extrahiert
Bildausschnitt "Stretchen"
geometrisch genaues Modell
1) hierzu wäre eine schnellere Kantenermittlung wünschenswert

Abb. 7: Zum Umgang mit der redundanten Information

Einige Anwender benötigen Messung und Auswertung vor Ort, andere möchten gerade die Verweildauer draußen kurz halten. In den bisherigen Darstellungen wurde davon ausgegangen, dass im Anschluss an die Aufnahme der Objektbilder die Hauptarbeit vor Ort geschieht. Dies ist nicht zwingend notwendig. Ähnlich wie bei der photogrammetrischen Auswertung kann man zunächst die vollständige Aufnahme der Bilder vornehmen und diese dann häuslich markieren, sodass der gesamte Arbeitsgang vor Ort, also die tachymetrische Messung und die Korrelation von Geometrie und Merkmalsextraktion aus den Bildern, weitgehend vollautomatisch und sehr schnell abläuft. Mit einer modernen, bilderfassenden Totalstation (Video-Totalstation/IATS, Abb. 1) dürfte unter Nutzung der Möglichkeiten zur Merkmalsextraktion die Verweildauer vor Ort nur kurz sein. Damit eröffnet sich eine neue Arbeitsweise:

- Photographische Aufnahme des Objektes, vorsortierter Bildverband
- Kennzeichnung der zu messenden Situation am Computer, z. B. über ein Auswahlmenü am Bildschirm, ebenso die Verknüpfung benachbarter Bilder
- Aufstellung der Totalstation vor Ort, äußere Orientierung der Bilder
- Automatischer Messungsablauf anhand der Vorab-Kennzeichnung

Ein geübter Nutzer der Phototachymetrie wird aber auch – noch wirtschaftlicher – umgekehrt verfahren können: Messung der wenigen notwendigen Koordinaten vor Ort und häusliche Modellierung.

3 Qualitätskontrolle

Geometrische bzw. visuelle (die Textur betreffende) Richtigkeit einerseits und die Vollständigkeit der Aufnahme andererseits sind zu überprüfen. Verschiedene Werkzeuge erlauben dies während der Aufnahme (s. Abb. 8).

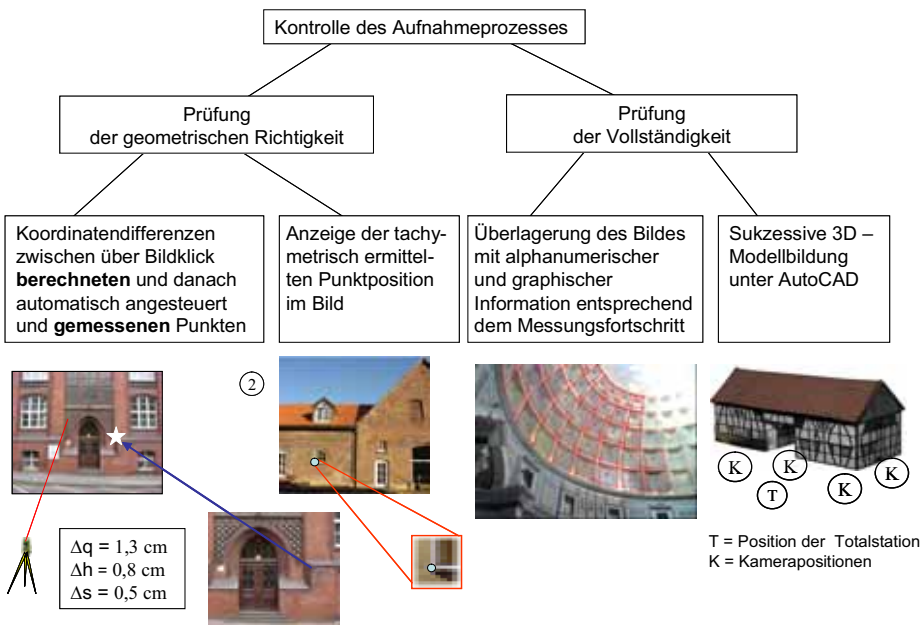

Kontrolle des Aufnahmeprozesses
Prüfung der geometrischen Richtigkeit
Prüfung der Vollständigkeit
Koordinatendifferenzen zwischen über Bildklick **berechneten** und danach automatisch angesteuert und **gemessenen** Punkten
Anzeige der tachymetrisch ermittelten Punktposition im Bild
Überlagerung des Bildes mit alphanumerischer und graphischer Information entsprechend dem Messungsfortschritt
Sukzessive 3D – Modellbildung unter AutoCAD
2
Δq = 1,3 cm
Δh = 0,8 cm
Δs = 0,5 cm
K
T
T = Position der Totalstation
K = Kamerapositionen

Abb. 8: Qualitätskontrolle

Besonders wenn Koordinaten aus dem Zusammenwirken tachymetrischer und photogrammetrischer Messung hervorgehen, hängt die Genauigkeit von der äußeren und der inneren Orientierung sowie der Definition der örtlichen Geometrie aus tachymetrischer Messung ab. Neben der visuellen Überprüfung zwischen gemessenem Punkt und Punktlage im Bild können Koordinaten dadurch kontrolliert werden, dass die Totalstation nach dem Klick ins Bild mit anschließender Berechnung automatisch den entsprechenden Punkt am Objekt anfährt. Differenzen lassen sich als „Tiefen- und Querablage“ darstellen. Neben der Kontrolle der Geometrie und der Anpassung zwischen Textur und Geometrie ist die Vollständigkeit der Aufnahme vor Ort zu überprüfen. Hierzu sind als Werkzeuge zum einen die alphanumerischen und grafischen Informationen verfügbar, die schon während der Aufnahme dem Bild überlagert werden (s. Abb. 8 rechts). Dies kontrolliert die Arbeit mit dem einzelnen Bild. Um die Modellbildung im Ganzen zu prüfen, steht unter AutoCAD zum anderen das wachsende 3D-Modell zur Verfügung. Lücken sind sofort erkennbar; die direkte Verknüpfung zwischen dem AutoCAD-Modell, der Datenbank und dem Bildverband ermöglicht jederzeit eine schnelle Kontrolle. Dabei ist auch die Markierung der Position der Totalstation im Modell hilfreich.

4 Fazit und Ausblick

Die Phototachymetrie als neue Methode zur Baufaufnahme und Visualisierung basiert auf den Entwicklungen der Instrumententechnik in letzter Zeit: dem intelligenten Tachymeter und der Digitalkamera. Über die bereits aufgezeigten, vielfältigen Möglichkeiten zur schnellen Modellierung hinaus ist in naher Zukunft ein Innovationsschub zu erwarten: Die Totalstation mit integrierter professioneller Kameratechnik (IATS – Image Assisted Total Station) wird durch Nutzung der Merkmalsextraktion und durch höhere Geschwindigkeit bei der Aufnahme der dem Bild zugehörigen 3D-Situation – höher, als es die derzeitige intelligente Tachymetrie erlaubt – einen hohen Automationsgrad ermöglichen. Man darf gespannt sein, wie die Entwicklung weiter verläuft, ob von der aktiven Totalstation her unter Vereinnahmung des Laserscanners, oder von Seiten des passiven Laserscanners unter Vereinnahmung der Totalstation. In jedem Fall ist es sinnvoll, sich mit dem Thema Phototachymetrie zu befassen, denn bereits heutige Totalstationen decken einen erheblichen Umfang der Möglichkeiten ab. Derzeit wird an der Ruhr-Universität Bochum das bestehende Programm zur Bauaufnahme mit intelligenter Totalstation neu konzipiert, sodass durch direkte Einbindung der Funktionalitäten in AutoCAD eine universell nutzbare Steuer- und Auswertesoftware für die Phototachymetrie entsteht.

Literatur

Juretzko, M. (2005): *Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen*. In: DGK Reihe C, Nr. 588, München. 122 S.

Scherer, M. (2004): *Intelligentes Scannen mit elektronischen Tachymetern unter Einbeziehung von Digitalbildern*. Ingenieurvermessung 2004, Tutorial Laserscanning, Zürich

TOPCON (2005) (Ed.): DVD Optical Product line-up. GTP7000.pdf

Walser, B. (2005): *Development and Calibration of an Image Assisted Total Station*. In: IGP Mitteilungen Nr. 87, Zürich. 168 S.

Optische 3D-Navigation von Sensoren

Volker SAHRHAGE, Ralph RIEDE und Thomas LUHMANN

Zusammenfassung

Im Folgenden wird die Konzeption eines optischen 3D-Navigationssystems dargestellt, welches die freie Orientierung eines Sensors im Raum und die Transformation der erzeugten Messwerte in ein übergeordnetes Koordinatensystem umfasst. Weiterhin wird die Realisierung einer Beispielanwendung in Form eines freihändig geführten Koordinatenmesssystems dargestellt, welches als Kombination eines Zwei-Kamera-Systems und eines Laserdistanzmessgerätes 3D-Koordinaten erzeugt. Die dabei erarbeiteten Verfahren sollen im Anschluss auch bei anderen Navigator/Sensor-Kombinationen Anwendung finden.

1 Einleitung

Bereits seit mehreren Jahren sind Messsysteme auf dem Markt, mit denen freihändig geführte Sensoren oder Werkzeuge im Raum orientiert und gemessen werden können. Das zur Navigation genutzte Aufnahmesystem variiert dabei von bildgebenden Ein- und Mehrkamera-Systemen (z. B. AICON TraceCam/ProCam, AXIOS 3D Services CamBar, Steinbichler T-Scan, Metris K-Serie) bis zu Lasertracker-gestützten Lösungen (z. B. Leica T-Scan). Allen Systemen gemeinsam ist die Aufgabe, die sechs Freiheitsgrade (6 DOF) eines Körpers im Raum zu bestimmen, wobei die mathematischen Lösungen von der 3D-Transformation gemessener 3D-Punktgruppen (Zwei- oder Mehrkamera-Systeme), über Methoden basierend auf Rückwärtsschnitten (Einkamera-Lösungen) bis hin zu hybriden Sensorensystemen (Entfernungsmessungen, INS) reichen. Aktuelle Übersichten geben KYLE (2005) und LUHMANN (2005)

Das Projekt befasst sich mit der Navigation messwertgebender Sensoren in einem beliebigen Verbund aus Navigator (Ein-Kamera-System, Zwei-Kamera-System, Spiegelstereovorsatz etc.) und Sensor (Handtaster, Distanzmessgerät, Streifenprojektor etc.). Derzeit verfügbare optische Navigationslösungen bestehen zum Teil aus zwei bis vier synchron arbeitenden, digitalen Kameras, aus deren Aufnahmen die Orientierungswerte eines mobilen Sensors berechnet werden. Diese Systeme liefern in einem relativ kleinen, definierten Messvolumen gute Messgenauigkeiten von etwa einem 1/10 mm in Aufnahmerichtung. Die Signalisierung der verschiedenen Sensoren (Handtaster, Zeilenscanner) erfolgt dabei sowohl passiv als auch aktiv. Einschränkungen bestehen hier allerdings in der Größe des Messvolumens sowie in den von der Aufnahmeentfernung abhängigen Messgenauigkeiten. Entfernungsunabhängige Systeme nutzen zum einen Lasertracker mit optischer Einheit zur Navigation. Im Gegensatz zu den rein optisch arbeitenden Systemen bietet der Lasertracker ein weitaus größeres Messvolumen von bis zu 30 m rund um den Standpunkt bei relativ homogenen Genauigkeiten im gesamten Messvolumen. Eine Alternative zum Lasertracker stellen Indoor-GPS-Systeme dar. Der Sensor wird hier durch Laserlichtwellentriangulation navigiert.

Aus den Eigenschaften der angesprochenen Systeme lassen sich die Anforderungen an ein zu entwickelndes Sensornavigationssystem ableiten. Ein derartiges System sollte aus einem

oder mehreren Navigatoren bestehen, die ein möglichst uneingeschränktes Messvolumen bieten und in der Lage sind, verschiedene und entsprechend signalisierte Sensoren dreidimensional zu erfassen, ihre jeweiligen Einzelmessungen im 3D-Raum zu verknüpfen und die Ergebnisse in Echtzeit zu visualisieren. Um dem System größtmögliche Flexibilität zu geben, wird lediglich ein Adapter navigiert, der mit verschiedenen Sensoren kombinierbar ist. Dabei soll eine beliebige Rotation des Sensors ohne Abschattungen möglich sein.

2 Konzeption

2.1 Koordinatensysteme

Im Gesamtsystem existieren drei räumliche Koordinatensysteme, deren Bezug untereinander herzustellen ist (Abb. 1). Das Kamera- oder Navigatorsystem ist ein örtliches, im Kameraverbund definiertes 3D-Koordinatensystem, in dem die photogrammetrischen Koordinaten erzeugt werden. Das Sensorkoordinatensystem ist das System, in dem der Sensor seine individuellen Messgrößen erzeugt. Das Objekt- oder Werkstückkoordinatensystem schließlich ist das Koordinatensystem, in das die gewonnenen 3D-Koordinaten für die Anwendung transformiert werden.

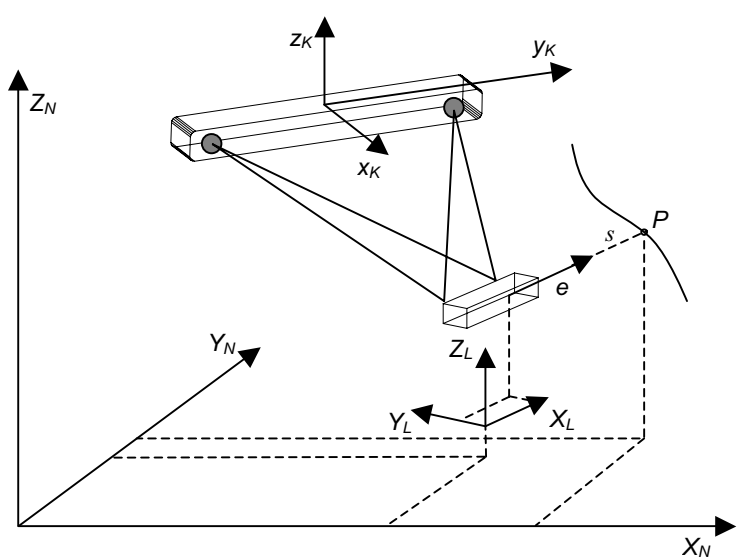


Abb. 1: Koordinatensysteme

2.2 Sensoradapter

Die Navigation eines Adapters (Lokator), der mit beliebigen Sensoren kombiniert werden kann, bietet sich als geeignete Lösung für ein flexibles System an. Die Position und Rotation des Lokators soll mit dem Navigationssystem bestimmt werden. Die zur Messung notwendigen Zielmarken sind in einer geometrisch eindeutigen Anordnung am Lokator platziert und besitzen Sollkoordinaten im lokatoreigenen Koordinatensystem. Als Zielmarken

werden Retrokugeln verwendet, um die Sichtbarkeit zu verbessern. Der Prototyp des Lokators besteht aus neun Marken, die über eine Grundplatte mit dem Sensor verbunden werden. Abschattungen werden durch die Anbringung der Zielmarken an exzentrischen Haltern reduziert.

2.3 Online-Kalibrierung

Verbindet man einen Sensor mit dem Lokator, so müssen zunächst das Offset zwischen dem Nullpunkt der Sensormessung und dem des Lokatorkoordinatensystems sowie der Richtungsvektor der Messung bekannt sein. Diese Werte können durch eine Online-Kalibrierung bestimmt werden.

Liegen mindestens drei Messungen eines identischen Punktes aus unterschiedlichen Richtungen des Sensors und die zugehörigen Rotationen und Translationen des Lokators im Kamerakoordinatensystem vor, so können alle Unbekannten zusätzlich zu den ausgeglichenen Punktkoordinaten bestimmt werden. Die Bestimmung des Punktes P im Lokatorkoordinatensystem X_L, Y_L, Z_L ergibt sich aus dem Offset Δ_{XYZ} zwischen Lokatornullpunkt und Nullpunkt der Streckenmessung, dem Einheitsvektor e parallel zur Messrichtung und der Strecke s.

$$P_L = e \cdot s + \Delta_{XYZ} \tag{1}$$

mit

e: Einheitsvektor

s: Messstrecke

Δ_{XYZ}: Offset zum Lokatornullpunkt

Mit den Elementen der Rotationsmatrix $r_{m,n}$ und der Translation x_L, y_L, z_L des Lokators im Kamerakoordinatensystem X_K, Y_K, Z_K ergibt sich folgendes Gleichungssystem für einen Neupunkt im Kamerakoordinatensystem:

$$\begin{vmatrix} X_{P_K} \\ Y_{P_K} \\ Z_{P_K} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} e_X \\ e_Y \\ e_Z \end{vmatrix} \cdot s + \begin{vmatrix} \Delta_X \\ \Delta_Y \\ \Delta_Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{vmatrix} \tag{2}$$

mit

$r_{m,n}$: Elemente der Rotationsmatrix

Führt man die Strecke des Einheitsvektors als zusätzliche Bedingung ein, so erhält man aus den drei Punktmessungen mindestens zehn Bedingungsgleichungen, aus denen die Unbekannten (e_x, e_y, e_z, Δ_x, Δ_y, Δ_z, X_P, Y_P, Z_P) berechnet werden können. Die Unbekannten werden erneut als Startwerte gesetzt. Die Iteration wird beendet, sobald sich die Quadratsumme der Verbesserungen nicht mehr signifikant ändert. Diese Vorgehensweise eignet sich für alle Sensoren, mit denen 3D-Koordinaten eines signalisierten Punktes erzeugt werden können. Bei einem geeigneten Zielkörper (Kugel) könnte z. B. auch aus einer Punktwolke die 3D-Koordinate des Kugelmittelpunktes als identischer Punkt abgeleitet werden.

3 Anwendungsbeispiel

Die Wahl einer geeigneten Anwendung zur Demonstration fiel auf die Navigation eines freihändig geführten Laserdistanzmessgerätes. Aus der Navigation dieses Gerätes ergibt sich die Möglichkeit, berührungslos 3D-Koordinaten zu erzeugen, ohne vom Messvolumen des Navigators abhängig zu sein. Ein solches Messsystem könnte z. B. im Bereich des Facility-Managements bei der Innenraumvermessung Streckenmessungen durch 3D-Punktmessungen mit mittlerer Genauigkeit (< 5 mm) ersetzen und 3D-Modelle in Echtzeit erzeugen. Dabei werden sowohl die Messungen des Sensors als auch seine Position und Orientierung im Messvolumen in Echtzeit visualisiert.

Aus den diversen denkbaren Navigator/Sensor-Kombinationen sind zunächst das Stereo-Aufnahmesystem CamBar der Firma Axios 3D Services und ein Disto™ *plus* der Firma Leica gewählt worden. Der CamBar dient dabei als Navigator, das Distometer als Sensor (Abb. 2). Für beide Systeme existieren Softwareschnittstellen, die den Zugriff auf die jeweiligen Messwerte erlauben (LEICA 2004, AXIOS 3D 2005).

Das CamBar Messsystem basiert auf einer Stereobildmessung mit 15 Hz Aufnahmefrequenz. Um Fremdlicht zu eliminieren, verfügen die Kameras über Bandpassfilter und Ringblitze für infrarotes Licht. Der Disto™ *plus* bestimmt die Raumstrecke zu einem durch einen Laser markierten Punkt und gibt diese in Millimetern ohne Nachkommastellen als Messergebnis zurück. Zur Navigation des Distometers wird dieses mit dem beschriebenen Lokator verbunden.

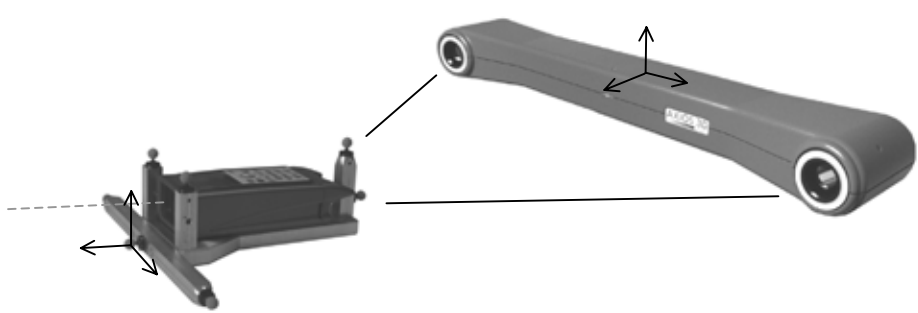


Abb. 2: Freihand geführtes 3D-Koordinatenmesssystem

Beides zusammen wird frei im Gesichtsfeld des CamBar (ca. 1 m^3) bewegt, während eine Permanentmessung des Lokators erfolgt. Die Kalibrierung der Beziehungen zwischen Sensor und Lokator erfolgt durch die Messung eines identischen Punktes aus mindestens drei verschiedenen Richtungen. Diese Messung erfolgt von einem Stativ aus. Bei unveränderter Orientierung des CamBar können, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, die Unbekannten berechnet werden. Näherungswerte für das Offset lassen sich abgreifen. Für den Einheitsvektor können sie bei bekannter Lage des Lokatorkoordinatensystems geschätzt werden.

Synchron zur Auslösung einer Streckenmessung wird die Orientierung des Lokators registriert und die 3D-Koordinate des Messpunktes durch polares Anhängen an den Lokator-

nullpunkt bestimmt. Die Messung wird per Knopfdruck am Distometer oder durch das User-Interface ausgelöst. Der Datentransfer erfolgt per Bluetooth.

4 Messung und Genauigkeit

Aufgrund der großen Aufnahmedistanzen birgt diese Anwendung allerdings weiteres Ungenauigkeitspotenzial. Die Rotationsmatrix des Lokators im Navigatorkoordinatensystem erhält man aus der Messung der Lokatorgeometrie mit dem Navigator. Da die jeweiligen Messwerte des Sensors polar an den Lokatornullpunkt angehängt werden, ist die Neupunktgenauigkeit stark von der exakten Bestimmung der Rotationsmatrix abhängig. Kleinste Verdrehungen der senkrecht zur Messrichtung liegenden Koordinatenachsen bewirken einen Versatz des Messpunktes.

Der Einfluss Δx_P einer fehlerhaften Orientierung auf den Neupunkt lässt sich abschätzen mit:

$$\Delta x_P = \tan\alpha \cdot s \tag{3}$$

mit

α: Winkel der Verdrehung

s: Messstrecke

Da die Aufnahmeentfernung bei unterschiedlichen Sensoren variiert, muss die Basislänge b auch für größere Aufnahmeentfernungen wie in diesem Anwendungsbeispiel optimiert werden. Mit der Aufnahmeentfernung s und der maximal zulässigen Abweichung Δx_P ergibt sich ein notwendiger Punktabstand zwischen zwei Lokatorpunkten, wie in Abbildung 3 dargestellt.

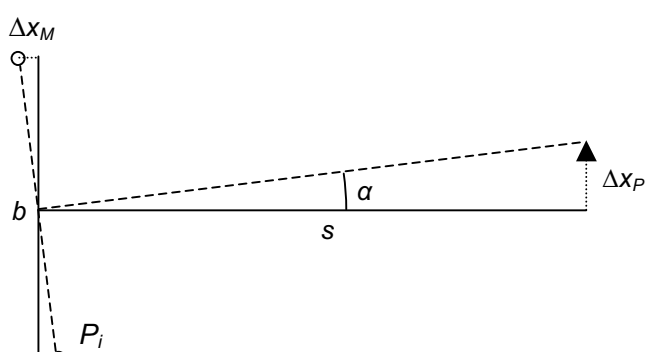


Abb. 3: Resultierender Fehler Δx_P bei einer Verdrehung der Basis b

Schätzt man die Punktmessgenauigkeit Δx_M anhand der Genauigkeit der Objektkoordinatenberechnung im Stereonormalfall (LUHMANN 2003) auf 0,1 mm, ergibt sich für eine maximal zulässige Abweichung Δx_P von 5 mm und einer Aufnahmedistanz s von 500 mm eine erforderliche Basis zwischen zwei Punkten P_i bei entgegengesetzt wirkendem Punktfehler

von mindestens 20 mm. Bei 5000 mm Abstand zum Messpunkt wäre bereits eine Basislänge von 200 mm erforderlich. Aus Gründen der besseren Handhabung sind die Basislängen des Lokatorprototyps nicht größer als ca. 270 mm in x- und y-Richtung und als 100 mm in z-Richtung gewählt worden. Mit dem kürzesten Punktabstand zweier senkrecht zur Aufnahmerichtung liegender Lokatorpunkte von 100 mm ließe sich nach dieser Abschätzung lediglich bei einer Strecke von bis zu 2500 mm die geforderte Genauigkeit erreichen. Um die Rotation des Lokators möglichst genau zu ermitteln, soll eine Permanentmessung (15 Messungen pro Sekunde) des Lokators während der gesamten Messdauer des Sensors erfolgen. Die Ergebnisse werden gewichtet und im Anschluss gemittelt.

Mit den Standardabweichungen für e_x, e_y, e_z, Δ_x, Δ_y, Δ_z, x_L, y_L, z_L und s lässt sich die Objektgenauigkeit eines Messpunktes abschätzen mit

$$\begin{aligned} s_x^2 = \quad & s_0^2 \cdot \big[\, (r_{11} \cdot s)^2 \cdot Q_{e_X e_X} + (r_{12} \cdot s)^2 \cdot Q_{e_Y e_Y} + (r_{13} \cdot s)^2 \cdot Q_{e_Z e_Z} \\ & + r_{11}^2 \cdot Q_{\Delta_X \Delta_X} + r_{11}^2 \cdot Q_{\Delta_Y \Delta_Y} + r_{11}^2 \cdot Q_{\Delta_Z \Delta_Z} \\ & + 2 \cdot (r_{11} \cdot s) \cdot (r_{12} \cdot s) \cdot Q_{e_X e_Y} + 2 \cdot (r_{11} \cdot s) \cdot (r_{13} \cdot s) \cdot Q_{e_X e_Z} + \ldots \, \big] \\ & + (r_{11} \cdot e_X + r_{12} \cdot e_Y + r_{13} \cdot e_Z)^2 \cdot s_S^2 \\ & + s_{x_L}^2 \end{aligned} \tag{4}$$

mit

$r_{m,n}$: Elemente der Rotationsmatrix

Q: Elemente der Kofaktormatrix

Die Objektgenauigkeiten in y- und z-Richtung ergeben sich mit den entsprechenden Elementen der Rotationsmatrix, des Einheitsvektors und des Offsets. Berechnet man die zu erwarteten Standardabweichungen der jeweiligen Koordinatenrichtungen für eine Aufnahmeentfernung von 5000 mm und eine Rotation des Sensors jeweils parallel zu einer der Koordinatenachsen des Aufnahmesystems, ergeben sich die in Tabelle 1 angegebenen Werte.

Tabelle 1: Genauigkeitsabschätzungen

Aufnahmeentfernung [mm]	***sx* [mm]**	***sy* [mm]**	***sz* [mm]**
5000 (parallel zu x)	2,4	8,2	17,4
5000 (parallel zu y)	8,3	3,6	17,1
5000 (parallel zu z)	17,3	8,3	2,3

Es zeigt sich, dass die parallel zur Messrichtung des Distometers liegenden Koordinatenachsen genauer bestimmt werden können, da die zuvor angesprochenen Einflüsse der Rotation und auch des Einheitsvektors hauptsächlich senkrecht zur Messrichtung wirken.

Durch verschiedene Messungen sollte geklärt werden, welche Genauigkeiten erreicht werden können. Um einen Einfluss der Rotation des Lokators auf das Messergebnis aufzudecken, sind die Messungen jeweils einmal parallel zur Messrichtung des CamBar und senkrecht dazu durchgeführt worden. Eine Untersuchung des Messrauschens ergab maximale Standardabweichungen einer 3D-Koordinate einer 100-mal wiederholten Messung von 0,3 mm. Weiterhin wurden ein räumliches Passpunktfeld (10 × 10 × 2 m, 15 Passpunkte) und eine ebene Kalibrierplatte mit dem System gemessen.

Tabelle 2: Ergebnisse der durchgeführten Versuche

	max. Abweichung [mm]	**mittl. Abweichung [mm]**
Passpunktfeld (Zielweite > 5 m)	15,1	7,9
Abweichung aus der Ebene	1,3	0,4

Die Versuche zeigten hinsichtlich der Rotation des Lokators in Verbindung mit der Messung der Ebene keine signifikanten Unterschiede zwischen paralleler und senkrechter Aufnahme. Bei der Untersuchung des Messrauschens fiel allerdings auf, dass die Neupunktkoordinaten bei paralleler Messung zur Aufnahmerichtung des CamBar in der entsprechenden Koordinatenrichtung stärker rauschten. Dies liegt vermutlich an der nur auf ganze Millimeter bestimmten Streckenmessung des Distometers, die mit einer Schwankung von 1 mm behaftet ist.

Als Fazit der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass die relativ großen Aufnahmeentfernungen des erarbeiteten Anwendungsbeispiels zu Fehlern in den ermittelten 3D-Koordinaten quer zur Messrichtung des Distometers führen. Die angestrebte Messgenauigkeit von 5 mm im 3D-Punkt kann mit der derzeitigen Version nicht erreicht werden. Dennoch zeigen die Untersuchungen, dass das System mit 8 mm mittlerer Abweichung der 3D-Koordinaten im Rahmen der Genauigkeitsabschätzung liegt.

5 Ausblick

Die Weiterentwicklung des Messsystems wird zukünftig in mehreren Teilbereichen erfolgen. Zum einen sollen verschiedenartige Sensoren mit dem Navigator eingesetzt werden. Gerade die Verknüpfung von Oberflächenmessungen wäre mit diesem System ohne weitere Verknüpfungspunkte oder Matching denkbar. Aber auch die Orientierung einer Kamera zur Aufnahme eines Bildverbandes ist möglich. Zusammen mit dem Messbild liegen in diesem Fall nach der Messung bereits die äußeren Orientierungen vor.

Unabhängig vom Sensor soll auch das Aufnahmesystem des Navigators erweitert werden. Hier soll die Navigation durch ein Ein-Kamera-System umgesetzt werden, um im Anschluss eine Vergrößerung des Sichtfeldes durch ein verteiltes Mehrkamera-System (z. B. bei Kombination aus Stereosystem und Einzelkamera) zu erreichen. Die Umsetzung beinhaltet die Lösung von dabei auftretenden Kalibrierungs- und Orientierungsproblemen.

In diesem Rahmen soll auch ein Verfolgungskonzept erarbeitet werden. Dazu ist die Prädiktion der Bahn eines mobilen Sensors notwendig (HENNING et al. 2006), um im Anschluss nur den relevanten Bildbereich auszuwerten. Durch die näherungsweise bekannte

Position des Sensors können ggf. auch nur einzelne Aufnahmesysteme eines Mehrkamerasystems angesprochen werden. Je nach Position des Sensors im Messvolumen ist so die optimale Aufnahmegeometrie bei gleichzeitig nur geringen Datenaufkommen wählbar. Ebenso ist mit diesem Prinzip die Verfolgung des Sensors über miteinander verbundene Räume oder Messbereiche denkbar.

Literatur

AXIOS 3D Services GmbH (2005): *AXCamBar 2.3_beta Benutzerhandbuch, Version 1*

Henning, M., Sahrhage, V. & B. Hentschel (vorauss. 2006): *3D-PTV-System: Optische Vermessung von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in physikalischen Modellen*. In: Mitteilungsheft der Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, Karlsruhe, Ilmenau

Kyle, S. A. (2005): *Alternatives in 6D Probing*. Coordinate Metrology Systems Conference, Austin, Texas

Leica AG, Heerbrug (2004): *DISTO™ plus[5] Online Manual, Version 3.00*

Luhmann, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. 2. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Luhmann, T. (2005): *On the determination of objects rotation and translation in 3-D space (6 DOF) by a single camera*. Optical 3-D Measurement Techniques

Suthau, T. (2005): *Sensorfusion von Augmented Reality Komponenten für die medizinische Navigation.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Uenohara, T. (1995): *Vision-based object Registration for real-time image overlay*. In: Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine: CVRMed ’95. N. Ayache, Berlin, Springer-Verlag. 14-22

Optische 3D-Messverfahren

Flexibles Streifenreflexionssystem zur topologischen Prüfung der Flugzeugaußenhaut und anderer glänzender Oberflächen

Reiner KLATTENHOFF, Thorsten BOTHE, Achim GESIERICH, Wansong LI,
Christoph VON KOPYLOW und Werner JÜPTNER

1 Vorwort

Die Streifenreflexion ist eine robuste, da schwingungsunempfindliche und nicht kohärente Messtechnik, die die Charakterisierung spiegelnder bzw. glänzender Oberflächen ermöglicht. Mit dieser Technik können eine Vielzahl von Objekten untersucht werden, die mit herkömmlichen optischen und taktilen Messmethoden nur unzureichend beschrieben werden können. Aus den Messdaten der Streifenreflexion, die die Oberflächenwinkel (Gradienten) beinhalten, lassen sich durch eine weitere Auswertung die lokale Krümmung sowie für stetige Oberflächen eine Höhenkarte des Objektes berechnen. Die Auflösung reicht dabei bis in den nm-Bereich hinein. Die Streifenreflexionstechnik liefert eine Oberflächen- und Strukturbeschreibung, die neben einer Defekterkennung auch eine Qualifizierung erlaubt.

In diesem Beitrag wird in den Grundlagen kurz auf das Messprinzip der Streifenreflexion und das dazugehörige Geometriemodell eingegangen, welches schon im Tagungsband der vierten Oldenburger 3D-Tage (LUHMANN 2005) ausführlich beschrieben wurde. Hiernach werden am BIAS entwickelte Systeme vorgestellt, insbesondere ein kompaktes und mobil einsetzbares Streifenreflexionssystem, das per Vakuum an eine Objektoberfläche (hier am Beispiel der Flugzeugaußenhaut des Airbus A380 gezeigt) angesaugt werden kann. Abschließend sind Messbeispiele angeführt, die u. a. Hauptstrukturgrößen unterschiedlicher Lackoberflächen beschreiben und damit eine quantitative Beschreibung des Orangenhauteffektes liefern.

2 Grundlagen

2.1 Prinzip und Modell der Streifenreflexion

Bei der Anwendung der Streifenreflexionstechnik wird ein auf der Oberfläche eines Messobjekts gespiegeltes, sinusförmiges Streifenmuster betrachtet. Die Verzerrungen des Streifenmusters werden messtechnisch mithilfe der Absolutphasenmessung (BURKE 2002) ausgewertet, sodass sich der Ausgangsort der beobachteten Streifen mit hoher Auflösung bestimmen lässt. Durch die bekannte Geometrie der Anordnung von Monitor und Kamera zum Objekt kann für jeden Kamerapixel der Reflexionswinkel α bzw. die Oberflächennormale am Objekt bestimmt werden (Abb. 1). Der Abstand d definiert dabei die Empfindlichkeit des Systems. Durch die hohe Sensitivität der Streifenreflexionstechnik ist es möglich, die Änderung der Oberflächenwinkel im Bereich von µ-Grad zu messen und somit eine lokale Höheninformation im nm-Bereich zu erhalten (BOTHE 2004).

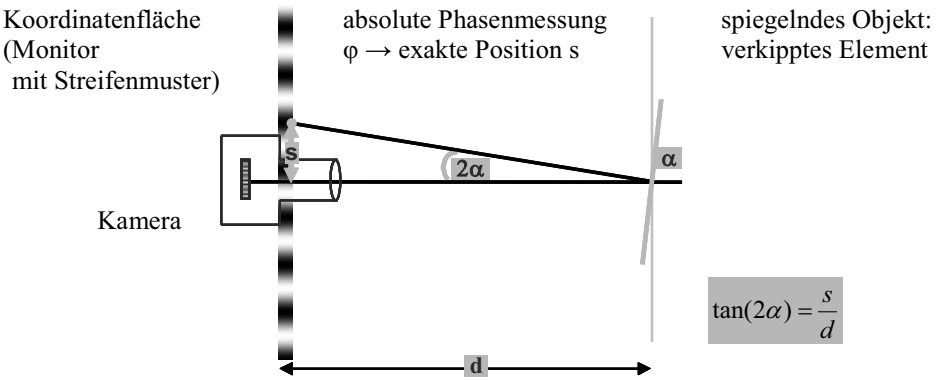


Abb. 1: Idealisiertes Geometriemodell mit Sichtstrahlverlauf für einen Kamerapixel

2.2 Ergebnisdaten und Auswertung

Die Beschreibung der gewonnenen Messdaten kann wie folgt vorgenommen werden: Als Beispiel ist in Abb. 2a die Spiegelung des Streifenmusters in einer Glasscheibe zu erkennen. Die eindeutig sichtbare Verzerrung tritt durch die Welligkeit am Rand der Glasscheibe auf, die im Bereich von etwa 10 bis 15 µm liegt. Aus der Messung lassen sich direkt die Oberflächenwinkel bzw. die Gradienten in x- und y-Richtung (Abb. 2b) bestimmen. Durch Integration und Differentiation lässt sich die Form [mm] (Abb. 2c) bzw. die Krümmung [Dioptrie = 1/m] (Abb. 2d) der Objektfläche gewinnen. Am Messbeispiel lässt sich im Krümmungsbild sehr gut die Welligkeit im Randbereich der Glasscheibe erkennen, die bei Betrachtung der Formdaten (Abb. 2c) aufgrund des hohen Dynamikbereiches nicht zu erkennen sind.

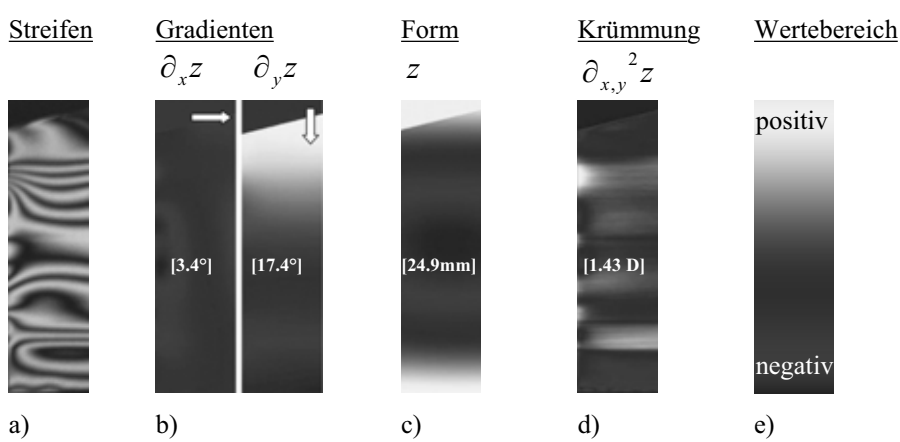


Abb. 2: Messergebnisse Glasscheibe: a) Streifen auf Glasoberfläche, b) Oberflächenwinkel in x/y-Richtung, c) Formdaten, d) Krümmung, e) Wertebereich

2.3 Anwendungsgebiete und Systementwicklung

Die Streifenreflexionstechnik wurde bereits auf nachfolgend aufgeführte, zumindest teilweise spiegelnde Materialien angewendet:

- Metall (Spiegel, Formen, Rohblech)
- Glas (Freiformlinsen, Scheiben, Head-Up-Displays)
- Plastik (Freiform-Augenoptiken, Spritzguss)
- Lack (Orangenhaut-Effekt, Lackfehler)
- Flüssigkeiten (reflektive Grenzfläche)

Um die genannten Messobjekte untersuchen zu können, wurden am BIAS mehrere Systeme konzipiert und aufgebaut: ein einfacher Aufbau auf einem Stativ (Abb. 3a), der neben einem TFT-Monitor, der das sinusförmige Streifenmuster generiert, eine Standard-CCD-Kamera beinhaltet. Dieser Messkopf ist frei im Raum und zum Messobjekt zu positionieren. Ein Standgerät (Abb. 3b) für kleinere Objekte bis 10 cm: Monitor und Kamera sind im oberen Bereich angebracht. Zusätzlich wurden zwei Laserpointer zur Justierung des Abstands von Kamera zu Objektoberfläche integriert. Das Messobjekt wird hierzu auf einer höhenverstellbaren Einheit befestigt und ausgerichtet. Um das Messsystem von Reflexionen und äußeren Lichteinflüssen abzugrenzen, wurde der Messraum gekapselt. Durch den robusten und kompakten Aufbau ist das System auch mobil einsetzbar; insbesondere dadurch, da die Ansteuerung und Datenauswertung per Laptop erfolgt.

a) b)

Abb. 3: Streifenreflektometer: a) frei positionierbarer Messkopf, b) kompaktes Tischgerät für kleinere und mittlere Messobjekte

Ein weiteres System wird im folgenden Hauptteil dieses Beitrags vorgestellt: ein flexibel einsetzbares Streifenreflexionssystem, das per Vakuum an einer Objektoberfläche angesaugt werden kann. Dieser Teil zeigt die Entwicklung des Systems von den Anforderungen über die Konstruktion bis hin zum Messablauf und der Präsentation eines Messbeispiels. Das System wurde in Zusammenarbeit des BIAS mit der Firma VEW (Vereinigte Elektronikwerkstätten Bremen) konstruiert und gebaut.

3 Mobiles Streifenreflektometer mit Ansaugung

3.1 Anforderungen an das Messsystem

Gegenüber den gezeigten Systemen der bisherigen Entwicklung wurden bei der Konstruktion dieses Systems einige Anpassungen in Bezug auf Handhabbarkeit und Funktionalität durchgeführt. Die Messumgebung, hier die Flugzeugaußenhaut des Airbus A380 (Abb. 4), erfordert es, dass der gesamte Messkopf an der Objektoberfläche angesaugt werden kann. Um dies zu erreichen, wurden beim Aufbau Bauteile verwendet, die nur ein geringes Gewicht aufweisen, wie z. B. Aluminium und CFK.

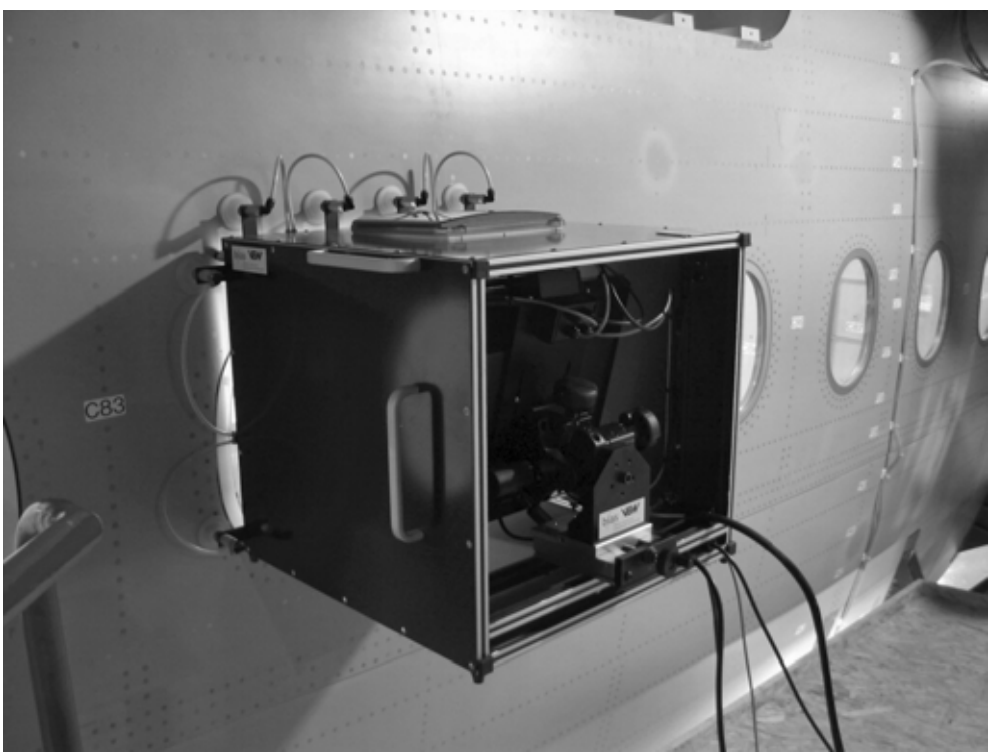


Abb. 4: Prüfung der Flugzeugaußenhaut am A380; System per Vakuum angesaugt

Die Ansaugung wird über Unterdruck erzeugt, welches mit Druckluftdüsen, die nach dem Venturi-Prinzip arbeiten, realisiert wird. Die Sicherheit gegenüber unvorhergesehenem Druckluftabfall und dem damit verbundenen Abfallen des Gerätes von der Flugzeugaußenhaut ist mithilfe von zwei Druckluftkreisen und eingebauten Drosselventilen gewährleistet, sodass sich das Messsystem erst nach 10 Sekunden von der Oberfläche löst.

Zusätzlich zu dem leichten, kompakten Aufbau und der Ansaugung an dem Objekt ist die Positionierbarkeit des Messkopfes zu nennen, die eine Ausrichtung des Messfeldes zur Objektoberfläche erlaubt, insbesondere für Wiederholungsmessungen.

3.2 Bauteilkomponenten

Das mobile Streifenreflexionssystem besteht aus handelsüblichen, industriellen Komponenten, die das System kostengünstig machen und gleichzeitig die einfache Austauschbarkeit einzelner Bauteile gewährleistet. Als Datenschnittstellen wurden für den Monitor eine DVI-Verbindung und für die CCD-Kamera der Einsatz des IEEE 1394-FireWire-Anschlusses gewählt. Die Steuerung des Systems sowie Aufnahme und Auswertung der Messdaten erfolgt mithilfe eines Laptops. Nachfolgend sind die wichtigsten Daten des Systems aufgeführt:

- Messentfernung zur Objektoberfläche: 350 [mm]
- Messfeld: 140 × 110 [mm]
- Auflösung der CCD-Kamera: 1392 × 1040 Pixel
- Größe / Auflösung des Monitors: 410 × 305 [mm] / 1600 × 1200 Pixel
- Gesamtgröße des Systems: 580 × 680 × 600 [H/B/T; mm]

3.3 Positionierbarkeit des Messkopfes

Da das Messsystem per Hand nur grob an den vorher festgelegten Markierungspunkten auf der Objektoberfläche angesaugt werden kann, muss das Messfeld justiert werden können. Dies wird mittels einer mechanischen Positioniereinheit in Kombination mit einer optischen Justage-Hilfe ermöglicht.

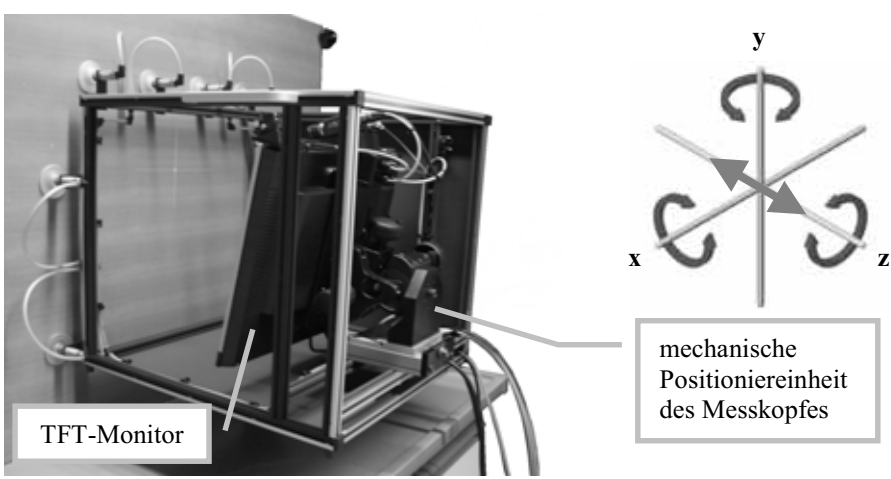


Abb. 5: Mechanische Positionierung mit Angabe der Drehachsen

Die mechanische Justierung erlaubt es, den gesamten im Aluminiumgehäuse befindlichen Messkopf, der neben dem Monitor die Kamera und die optische Justageeinheit enthält, in der Tiefe zur Objektoberfläche sowie in drei Rotationsachsen einzustellen, wie in Abb. 5 rechts oben dargestellt.

Um die Feinabstimmung des Messabstands vorzunehmen, bilden ein Laserpointer und ein Laserkreuz die optische Justageeinheit. Der Messkopf kann somit auch für Wiederholungsmessungen, unter Speicherung des Live-Bilds der Messsituation, in die gleiche Position gebracht werden. In Abb. 6 ist die Positionierung auf einen markierten Punkt eingezeichnet; darüber hinaus sind die an der Ober- und Seitenkante angebrachten Saugfüße, die das Streifenreflektometer an der Oberfläche ansaugen, zu sehen.

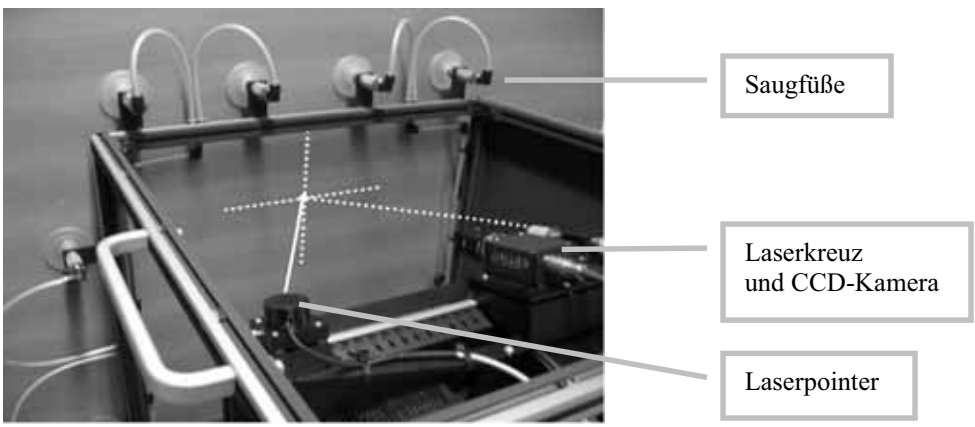


Abb. 6: Optische Justierung des Messkopfs an der Objektoberfläche

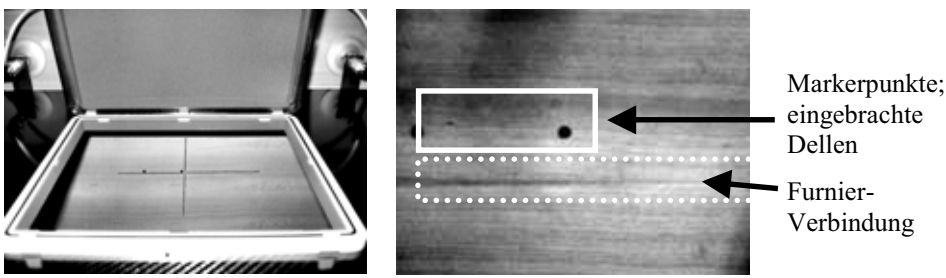
3.4 Messablauf und Beispielmessung einer lackierten Holzoberfläche

Für den Messvorgang (Abb. 7) wird die Objektoberfläche zuerst gereinigt, um dann das Gerät mit den Saugfüßen grob an markierten Punkten anzusaugen. Danach erfolgt die Justierung mittels mechanischer und optischer Positioniereinheit.

Abb. 7: Messablauf an der Flugzeugaußenhaut des Airbus A380

Da die Ergebnisse von der Flugzeugaußenhaut zum jetzigen Zeitpunkt nicht zur Veröffentlichung freigegeben sind, wird hier als vergleichbares Messproblem die Dellen- und Strukturvermessung an einer lackierten Holzoberfläche mit dem System gezeigt.

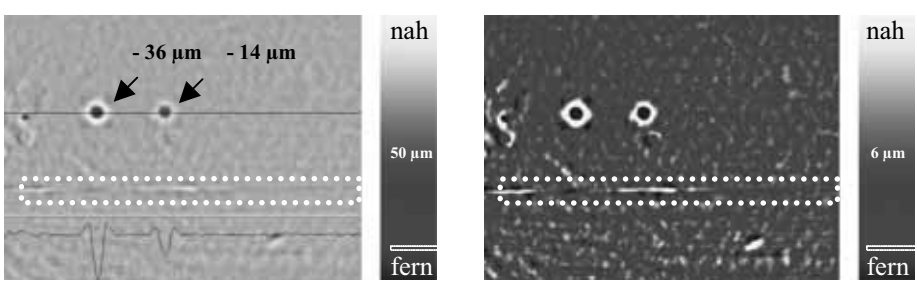
Für diese Messung wurde das System an die Holzoberfläche angesaugt und auf zwei Markerpunkte ausgerichtet, über denen drei Dellen eingebracht wurden (Abb. 8a). Im von der CCD-Kamera aufgenommenen Intensitätsbild (Abb. 8b) sind die Markerpunkte und die Struktur des Holzfurniers gut zu erkennen.



a) b)

Abb. 8: a) Ausgerichtetes System, b) Intensitätsbild der CCD-Kamera

Per Integration der Messergebnisse der Oberflächenwinkel lässt sich die Form bzw. das Höhenbild darstellen (Abb. 9a). Der Wertebereich ist auf 50 µm skaliert. In dieser Abbildung lassen sich sehr gut zwei Dellen in der Struktur erkennen, die durch den darunter gezeigten Zeilenschnitt nochmals verdeutlicht werden. Die Tiefe dieser Dellen beträgt 14 bzw. 36 µm. Der umrandete gepunktete Bereich zeigt eine Furnierverbindung (siehe Abb. 8b), die im linken Bereich zwei Lackrisse aufweist, gut zu erkennen in Abb. 9b.



a) b)

Abb. 9: Messergebnisse: a) Höhenbild, b) Oberflächenmikrostruktur

Um die feineren Strukturen hervorzuheben, wird der Wertebereich in Abb. 9b auf 6 µm skaliert. In dieser Darstellung wird die Oberflächenmikrostruktur der Lackschicht sichtbar (Orangenhaut/Verlauf der Lackschicht).

4 Messbeispiele an Lackoberflächen

Die in Abb. 9b gezeigte Mikrostruktur ist typisch für Lackoberflächen. Deren Vermessung ist ein wichtiges Thema für die Lackindustrie und für Lack-Anwender. Die Streifenreflexion liefert dafür geeignete Daten. Es folgen Messbeispiele zur Quantifizierung des Orangenhauteffektes sowie die Darstellung einer Auswertestrategie zur Beschreibung solcher Oberflächen.

4.1 Lackoberfläche mit Orangenhauteffekt

In Abb. 10a ist eine lackierte Autotür zu sehen, die eine Spiegelung des Bremer Fallturms zeigt. In der Vergrößerung ist eine orangenhautartige Struktur zu erkennen, die mit zugrunde liegenden Höhenvariationen im Bereich weniger µm auf einer Form mit mehreren mm Höhenunterschieden schwer mit Standardmesstechniken zu erfassen ist. Die Streifenreflexionstechnik ist in der Lage, die Struktur hochaufgelöst zu erfassen.

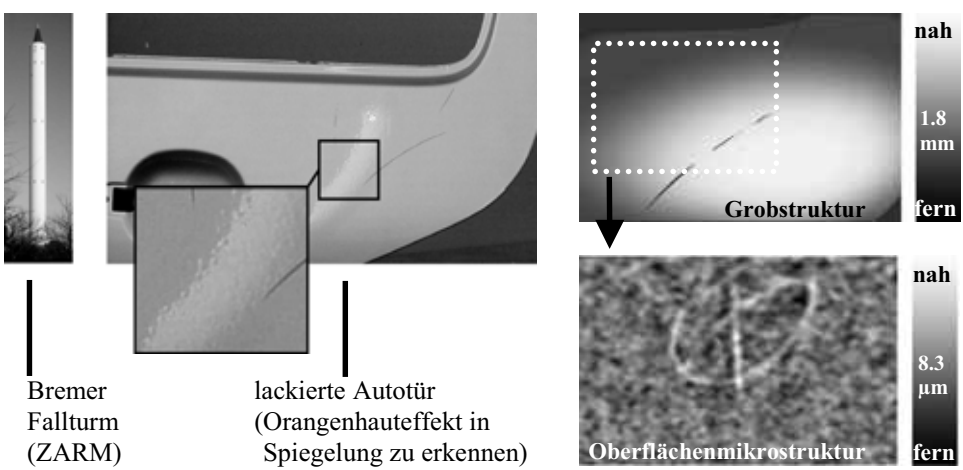


Abb. 10: a) Spiegelung in Autotür, b) Grob- und Oberflächenmikrostruktur

Abb. 10b oben zeigt die Form nach Integration der Oberflächenwinkel. Die gezeigten Formdaten weisen einen Wertebereich von 1,8 mm auf. Das eingezeichnete, gepunktete Messfeld kennzeichnet den darunter abgebildeten Bereich der Oberflächenmikrostruktur. Neben der orangenhautartigen Feinstruktur, die nach Einschränkung des Wertebereiches einen Dynamikumfang von 8,3 µm aufweist, ist eine Markierung auf dem Rohblech zu erkennen, die vor der Lackierung offenbar nicht entfernt wurde.

Der visuelle Eindruck der Lackstruktur (Orangenhauteffekt) hängt direkt mit der lokalen Krümmung der Objektoberfläche zusammen: ein starker optischer Effekt korrespondiert mit einer großen Krümmung (BOTHE 2005). Bisher wurden subjektive Tests eingesetzt, um die Oberflächenqualität von Lackoberflächen oder geformtem Plastik zu qualifizieren.

Rauigkeitsbeschreibungen der Oberfläche reichen allein nicht aus. Die Auswertung der Krümmung und der hochpassgefilterten Höhen-Mikrostruktur der Streifenreflexionstechnik bietet die Möglichkeit, eine objektive Beschreibung und Qualifizierung solcher Oberflächen durchzuführen. Im folgenden Abschnitt werden Ergebnisse dazu dargestellt.

4.2 Lackstruktur (Häufigkeit bestimmter Strukturgrößen)

Während des Lackierprozesses von z. B. Autoteilen werden verschiedene Materialschichten übereinander aufgetragen. Auf das Grundmaterial, dem Rohblech, wird zunächst eine Phosphatschicht aufgebracht, danach die Grundierung (Kathodentauchlack – KTL), Füller, Basislack und abschließend eine Klarlackschicht. Bis auf die Phosphatschicht, die absolut nicht spiegelnd ist, kann auf jeder der genannten Schichten mit der Streifenreflexionstechnik gemessen werden. Hiermit kann der gesamte Produktionsprozess der Lackierung insoweit unterstützt werden, zum Beispiel das am besten geeignete Füller-Material zu verwenden, damit der Orangenhauteffekt bei der abschließenden Basis- und Klarlacklackierung vermieden wird.

In Abb. 11a ist die Messsituation am Beispiel einer mit KTL grundierten Autotür zu sehen. Der Messkopf ist in definiertem Abstand mittels zwei gekreuzter Laserpointer auf die Oberfläche ausgerichtet (Abb. 11b). Die reflektierten Streifen in Abb. 11c zeigen das auswertbare Messfeld von 45 × 34 mm mit einer lateralen Auflösung von 50 µm.

a) b) c)

Abb. 11: KTL Inspektion: a) Messsituation, b) reflektierte Streifen, c) Messfeld CCD

Die Messergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt. Die Krümmung (Abb. 12a) zeigt neben der Oberflächenmikrostruktur einen Defekt mit einem starken Signal, welches in Abb. 12d vergrößert zu erkennen ist. Die berechneten Formdaten (Abb. 12 b) liegen im Wertebereich von 1,56 mm. Die Oberflächenmikrostruktur im Wertebereich von 3,7 µm ist erst nach Entfernung der Grobform zu sehen. Ist die aktuelle Form des gemessenen Bereichs nicht bekannt, so ist es schwierig, die 1,5 mm Freiform zu entfernen, um dann gültige Daten im Bereich von 3,7 µm zu bekommen. Polynome höherer Ordnung neigen dazu künstliche Strukturen zu erzeugen. Um die Oberflächenmikrostruktur in Abb. 12c gewinnen zu können, wurde ein erweiterter zweidimensionaler Savitzky-Golay-Filter (SAVITZKY & GOLAY 1964) eingesetzt. Der Bereich um den Fehler herum ist vergrößert in Abb. 12e zu sehen und zeigt eine Delle mit 2,4 µm Tiefe (Spaltenschnitt). Im Krümmungsbild in Abb. 12d ist eine höhere Frequenzkomponente erkennbar. Es entsteht der visuelle Eindruck, dass sich in diesem Bild zwei Strukturgrößen in lateraler Ausdehnung befinden. Diese lassen sich durch

eine bloße Angabe eines Rauigkeitswertes nicht erschöpfend beschreiben. Eine Frequenzanalyse erlaubt es, diese Strukturen quantitativ auf den verschiedenen lateralen Skalen bzw. Strukturgrößen zu beschreiben.

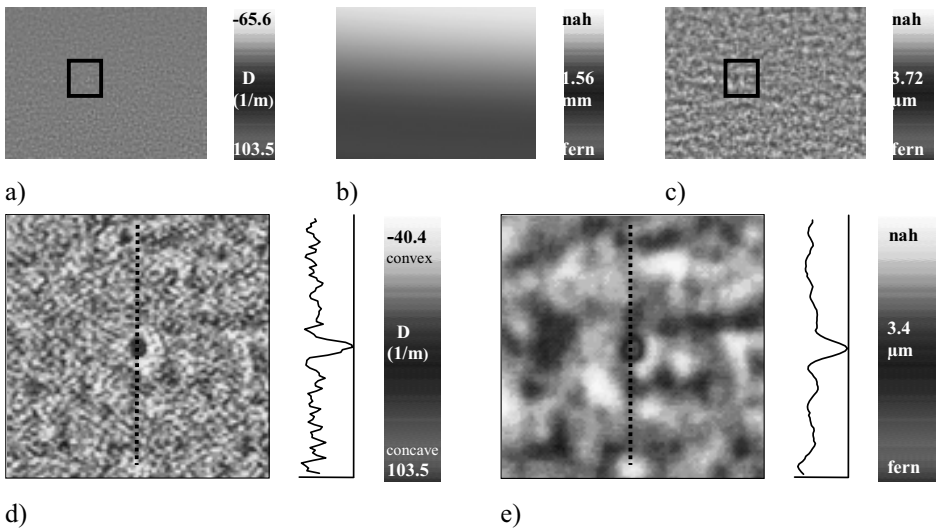


Abb. 12: a) Krümmung, b) Formdaten, c) Oberflächenmikrostruktur (Savitzky-Golay-Filter), d) Krümmung vergrößert, e) Oberflächenmikrostruktur vergrößert

Zur Darstellung der Frequenzanalyse wurden die Frequenzen eindimensional logarithmisch aufgetragen. Zusätzlich zum kontinuierlichen Spektrum wurde eine logarithmische Serie lateraler Intervalle definiert, die die Oberfläche in mehrere Strukturgrößen unterteilt: W_a[0,1-0,3 mm], W_b[0,3-1 mm], W_c[1-3 mm], W_d[3-10 mm]. Mithilfe der Fourierbandpassfilterung werden die Messergebnisse in diese Abschnitte separiert (Abb. 13).

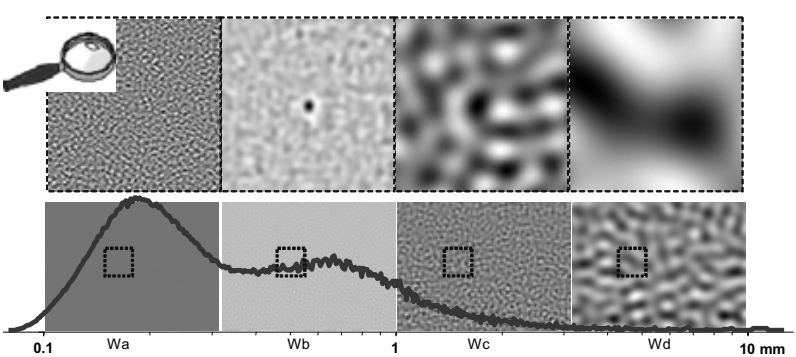


Abb. 13: Spektralanalyse (der Krümmung): logarithmisches Spektrum sowie Spektralkomponenten W_a, W_b, W_c, W_d mit vergrößertem Ausschnitt

Das analysierte Spektrum der KTL-Oberfläche (Abb. 13) bringt die beiden beobachteten Hauptfrequenzen bei 0,18 mm im Intervall W_a und bei 0,65 mm (wie auch den Defekt) in W_b zum Vorschein.

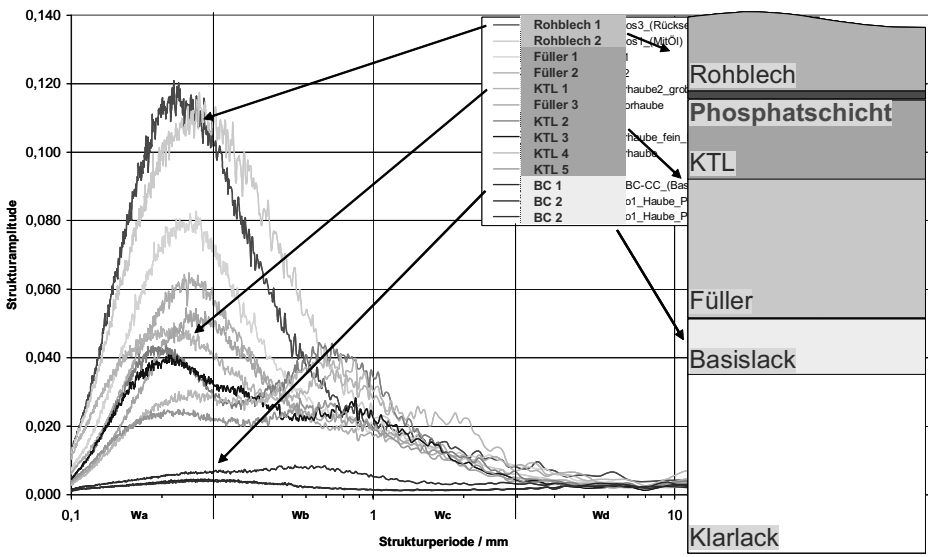


Abb. 14: Spektrum von Lackkrümmungen: Rohblech, KTL, Füller und Basislack

Unterschiedliche Schichten im Lackierprozess wurden mit der Streifenreflexion gemessen und anschließend wie beschrieben analysiert (Abb. 14). Es zeigt sich, dass die Spektralanalyse sehr selektiv ist und somit Strukturvariationen leicht sichtbar macht. Zusätzlich ist eine hohe Wiederholbarkeit gegeben: Messungen am gleichen Material ergeben identische Ergebnisse. Die Bestimmung der Hauptstrukturgrößen kann sehr hilfreich bei der Wahl der Materialparameter der nächsten Schicht sein, sodass am Ende des Lackierprozesses sehr glatte bzw. definierte Oberflächen entstehen und eine Vergleichbarkeit objektiv gegeben ist.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein flexibel einsetzbares Streifenreflexionssystem vorgestellt, das per Vakuum an eine Objektoberfläche angesaugt werden kann. Durch die mechanische und optische Justiereinheit bietet das System die Möglichkeit, Wiederholungsmessungen durchzuführen. Neben der Entwicklung dieses Messsystems wurde gezeigt, dass die Streifenreflexion eine sehr robuste Technik darstellt, mit der die Form unterschiedlich spiegelnder Oberflächen bis in den nm-Bereich vermessen werden kann. Beispielhaft wurde aus der Vielzahl möglicher Anwendungen der Streifenreflexionstechnik die Vermessung und Beschreibung von Lackoberflächen demonstriert. Über die Berechnung der Krümmung aus den Oberflächengradienten und anschließender Frequenzanalyse können Aussagen über die

Hauptstrukturgrößen von Lackschichten gewonnen werden. Diese können direkt in den Produktionsprozess einfließen, sodass die Auswahl der verwendeten Materialien aufeinander abgestimmt werden kann, um zum Beispiel den Orangenhauteffekt zu minimieren.

6 Danksagung

Vielen Dank an die Vereinigten Elektronikwerkstätten in Bremen (VEW) für die Unterstützung der Entwicklung und Konstruktion des flexibel einsetzbaren Streifenreflexionssystems sowie vielen Dank an die Firma Airbus, speziell Sascha Müller, für die konstruktive Zusammenarbeit.

Literatur

Bothe, T., Li, W., Kopylow, C. von & W. Jüptner (2004): *High Resolution 3D Shape Measurement on specular surfaces by fringe reflection.* In: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 5457. 411-422

Bothe, T., Li, W., Kopylow, C. von & W. Jüptner (2005): *Fringe Reflection for high resolution topometry and surface description on variable lateral scales.* FRINGE 2005

Bothe, T., Li, W., Gesierich, A., Kopylow, C. von & W. Jüptner (2005): *Streifenreflexion – 3D-Oberflächentopometrie an glänzenden Objekten.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 38-53

Burke, J., Bothe, T., Osten, W. & C. Hess (2002): *Reverse engineering by fringe projection.* In: Proc. SPIE Vol. 4778. 312-324

Savitzky, A. & M. J. E. Golay (1964): *Analytical Chemistry.* Vol. 36. 1627-1639

3D-Topographieerfassung mittels Weißlichtinterferometrie

Jan NIEHUES, Timo LORENZ, Peter LEHMANN,
Klaus BOBEY und Lutz BREKERBOHM

Zusammenfassung

Die Weißlichtinterferometrie wird in der industriellen Produktion und Qualitätssicherung zur Erfassung der 3D-Topographie von unterschiedlichsten Objekten eingesetzt. Neben einer hohen Tiefenauflösung bis in den Subnanometerbereich zeichnet sich das Messverfahren durch eine geringe Messunsicherheit aus, die unabhängig von der Messfeldgröße ist. Aufgrund der koaxialen Beleuchtung und Beobachtung gibt es keine Abschattung wie beispielsweise bei konventionellen Triangulationsmessungen, sodass auch in tiefen Strukturen exakt gemessen werden kann. Durch das Abtasten des Objekts entlang der optischen Achse (Tiefenscan) tritt kein Schärfentiefeproblem auf, sodass prinzipiell ein beliebiger longitudinaler Messbereich erfasst werden kann.

1 Messverfahren

1.1 Kohärente Beleuchtung

Das Messverfahren nutzt grundsätzlich die Interferenz elektromagnetischer Strahlung aus. Es basiert auf einem Michelson-Interferometer, bei dem das einfallende Licht mithilfe eines Strahlteilers in zwei Teilstrahlen aufgeteilt wird. Einer der beiden Strahlen wird zu dem feststehenden Referenzspiegel geleitet, während der andere Strahl in Richtung des Messspiegels abgelenkt wird. Beide Teilstrahlen werden reflektiert und anschließend im Strahlteiler zur Überlagerung gebracht, wodurch es – sofern der optische Wegunterschied innerhalb der Kohärenzlänge des verwendeten Lichts liegt – zur Interferenz kommt. Bei der Messung von Längenänderungen oder daraus abgeleiteten Größen wird wegen seiner großen Kohärenzlänge (ca. 60 m) i. Allg. ein Helium-Neon-Laser verwendet. Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines Michelson-Interferometers, wobei S_2 den Referenzspiegel und S_1 den beweglichen Messspiegel darstellt. Die Intensitätsmodulation als Folge der Interferenz kann an dem Schirm F beobachtet werden (HECHT 2001).

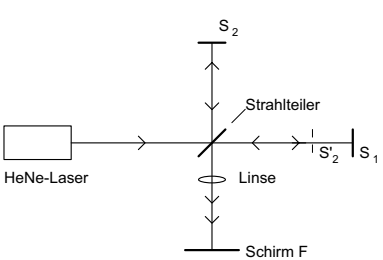


Abb. 1: Aufbau des Michelson-Interferometers

Der aus der Strahl-Überlagerung resultierende Intensitätsverlauf wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$I_F = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{\delta}{\lambda}\right) \quad (1)$$

Darin sind I_1 und I_2 die Intensitäten der Teilstrahlen und δ die optische Weglängendifferenz beider Strahlen. Der dritte Term in der Gleichung beschreibt die bei Verschiebung des Messspiegels S_1 auftretende Intensitätsmodulation. Der sich daraus ergebende Intensitätsverlauf an einem Punkt auf dem Schirm ist für den Fall $I_1 = I_2$ in Abbildung 2 dargestellt, wenn der bewegliche Spiegel in x-Richtung verschoben wird. Die Variation der Weglänge zwischen Mess- und Referenzstrahl wird Tiefenscan genannt.

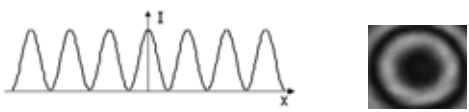


Abb. 2: Intensitätsverlauf und Interferogramm bei kohärenter Beleuchtung

Bei der hier betrachteten Erfassung von Oberflächentopographien liefert die Beleuchtung mit kohärentem Licht allerdings nur dann eindeutig messbare Höhenunterschiede, wenn das Messobjekt eine optisch glatte Oberfläche aufweist, auf der es keine Stufen gibt, die größer als die halbe Wellenlänge der verwendeten Strahlungsquelle sind. Derartigen Unstetigkeiten in der Oberfläche können aufgrund der Periodizität des Signals keine eindeutigen Höhenwerte zugeordnet werden.

1.2 Inkohärente Beleuchtung

Um Objektpunkten auf einer technischen Oberfläche eindeutige Höhenwerte zuordnen zu können, wird breitbandiges Licht (Weißlicht) mit einer Kohärenzlänge von wenigen Mikrometern verwendet. Erfolgt die Beleuchtung mit weißem Licht anstelle von Laserlicht, ergibt sich der in Abbildung 3 gezeigte Intensitätsverlauf. Beim Verschieben eines der beiden Spiegel kommt es wiederum zu einem kosinusförmigen Intensitätsverlauf, der jedoch zusätzlich mit einer Gaußfunktion moduliert ist. Sind die optischen Weglängen von Mess- und Referenzstrahl exakt gleich, so erhält man das Maximum der dargestellten Hüllkurve. Ist die optische Weglängendifferenz größer als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle, lässt sich keine Interferenz mehr beobachten.

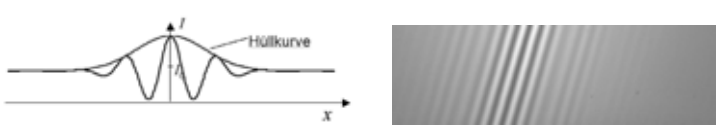


Abb. 3: Intensitätsverlauf und Interferogramm bei inkohärenter Beleuchtung

Der Verlauf der Gesamtintensität kann bei Verwendung einer inkohärenten Lichtquelle näherungsweise durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$I_F = I_0 \cdot \left[1 + V \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{\delta}{\bar{\lambda}} \right) \cdot \exp\left(- \frac{\delta^2}{2 \cdot \ln 2 \cdot l_c^2} \right) \right] \quad (2)$$

Der erste Term der Gleichung (GEBURTIG 2002) enthält die Summe der Einzel-Intensitäten, während der zweite Term mit der Sichtbarkeit V (engl. Visibility) der Interferenzstreifen die Modulation beschreibt, die sich aus dem kosinusförmigen Trägersignal und einer gaußförmigen Einhüllenden zusammensetzt. Letztere kann als Fouriertransformierte der spektralen Intensitätsverteilung aufgefasst werden, die ihr Maximum bei $\delta = 0$ hat, wobei die Kohärenzlänge l_c die Breite der Hüllkurve festlegt. Die Modulationsfrequenz wird durch die mittlere Wellenlänge $\bar{\lambda}$ der verwendeten Lichtquelle bestimmt. Da die Einhüllende der Modulation nur ein Maximum besitzt, ist somit eine eindeutige Zuordnung von Höhenwerten möglich.

Diese Eigenschaft breitbandiger Lichtquellen wird bei der Erfassung von Oberflächentopographien ausgenutzt. Die Entstehung einer solchen Topographieaufnahme soll mithilfe von Abbildung 4 erläutert werden.

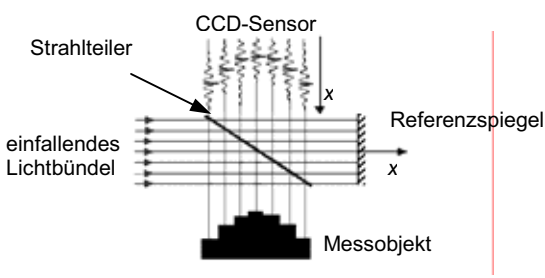


Abb. 4: Intensitätsverläufe für Objektpunkte mit unterschiedlicher Höhenlage

Die Abbildung 4 zeigt ein stufenförmiges Objekt, das mittels Weißlichtinterferometrie vermessen wird. Durch Verschieben des Referenzspiegels wird eine Ebene, die die gleiche optische Weglänge zum Strahlteiler besitzt wie der Referenzspiegel, im Messstrahlengang senkrecht zur Objektoberfläche verschoben. Dabei kommt es nur dann zur Interferenz, wenn ein Objektpunkt (hier eine Stufe) mit dieser so genannten Referenzebene zusammenfällt (KOCH 1998).

2 Das Messsystem MarSurf WS1

Bei dem hier betrachteten Messsystem handelt es sich um ein Interferenzmikroskop, dessen Aufbau und praktische Umsetzung in Abbildung 5 dargestellt sind.

Abb. 5: Aufbau und realisierter Messkopf des Messsystems MarSurf WS1

Das von einer Weißlicht-LED emittierte divergente Strahlenbündel wird im Kondensor parallelisiert und durchläuft anschließend den Strahlteiler, der lediglich zur Strahlführung eingesetzt wird. Die Aufspaltung in Referenz- und Messstrahl erfolgt im Mikroskopobjektiv (Mirau-Objektiv) über eine Strahlteilerplatte. Der eine Teilstrahl wird an einem Planspiegel reflektiert, wohingegen der transmittierte Strahl an der zu vermessenden Objektoberfläche reflektiert wird. Die Intensität an einem Kamerapixel entsteht aus der Überlagerung der entsprechenden Teilstrahlen. Der Tiefenscan erfolgt durch die schrittweise Höhenverstellung des Objektivs mithilfe eines Piezoaktors, wobei an jeder Position ein Bild aufgenommen wird. Der so gewonnene Bilderstapel enthält die an jedem Pixel entstandenen Interferenzsignale (NIEHUES 2004).

3 Signalauswertung

Die Auswertung der Signale ist bei technischen Oberflächen eine Herausforderung, da die Signale nicht immer so gut moduliert sind wie in der Theorie beschrieben (DE GROOT 2002). Unabhängig von der Modulationstiefe des Interferenzsignals wird immer zuerst die Hüllkurve gesucht und berechnet. Um eine höhere Sicherheit beim Auffinden des Maximums zu erhalten, wird eine Gaußfunktion in die berechnete Hüllkurve approximiert. Dem Maximalwert dieser Gaußfunktion wird der jeweilige Höhenwert zugeordnet. Das obere Diagramm in Abbildung 6 zeigt ein gemessenes Signal, in dem darunter liegenden Diagramm ist die berechnete Hüllkurve mit der im Maximum angenäherten Gaußkurve dargestellt.

Objekte mit einer optisch glatten Oberfläche liefern Signalverläufe mit großem Signal-Rausch-Abstand und einer deutlich erkennbaren Modulation. Bei derartigen Objekten lässt sich nach der Bestimmung des Hüllkurvenmaximums die Auflösung unter Berücksichtigung der Phasenlage erhöhen. Das untere Diagramm in Abbildung 6 zeigt das gemessene Signal und das für die Phasenauswertung mittels diskreter Fouriertransformation verwende-

te Trägersignal (Realteil), dessen Frequenz sich aus der mittleren Wellenlänge $\bar{\lambda}$ der verwendeten Leuchtdiode ergibt (DE GROOT 2004).

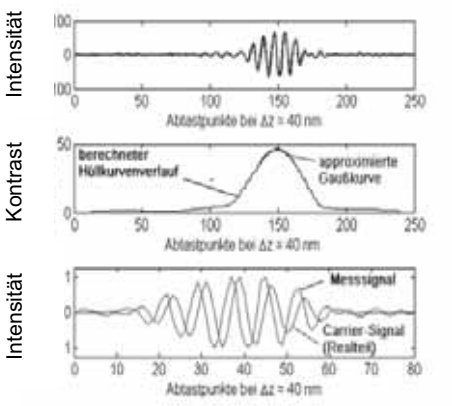


Abb. 6: Prinzip der Hüllkurven- und Phasenauswertung

3.1 Hüllkurvenauswertung

Bei Intensitätsverläufen, die einen geringen Signal-Rausch-Abstand aufweisen, ist nur eine Hüllkurvenauswertung möglich. Zu solchen Signalen kommt es vor allem dann, wenn das Messobjekt steile Flanken besitzt oder durch seine Oberflächenbeschaffenheit wenig Licht in den Sensor zurückreflektiert. In Abbildung 7 ist ein gemessenes Signal abgebildet. Das linke Diagramm zeigt das Ergebnis eines kompletten Tiefenscans. Im rechten Diagramm ist der Bereich, in dem sich die Interferenz befindet, vergrößert dargestellt. Da die mittlere Wellenlänge der Lichtquelle bekannt ist, lassen sich auch Signale genau bestimmen, deren Signalamplitude von der des Rauschens im CCD-Sensor nicht mehr unterscheidbar ist.

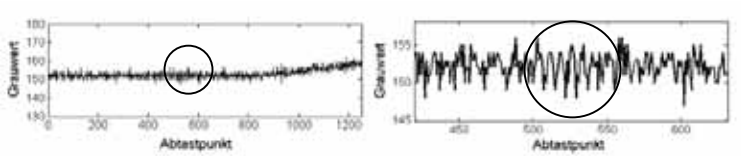


Abb. 7: Signal mit geringem Signal-Rausch-Abstand

In Abbildung 8 ist ein Objekt abgebildet, bei dem es zu solch einem kleinen Signal-Rausch-Abstand kommt. Es handelt sich hierbei um einen Ausschnitt aus einem deterministisch texturierten Stahlblech aus der Automobilindustrie. An den Flanken des Plateaus kommt es zu einer geringen Modulationstiefe des Signals, sodass hier ausschließlich eine Hüllkurvenauswertung möglich ist.

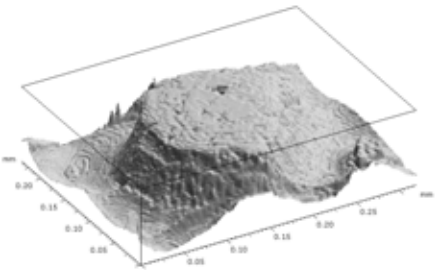


Abb. 8: Beispiel: Topographieaufnahme eines strukturierten Stahlblechs

Die bei der Hüllkurvenauswertung resultierende Auflösung von wenigen Nanometern reicht bei einer Gesamthöhe des Plateaus von 14 Mikrometern aus.

3.2 Phasenauswertung

Bei der Phasenauswertung werden Signale mit einer deutlich erkennbaren Modulation benötigt. Diese Modulationstiefe ist nur bei Signalen mit einem großen Signal-Rausch-Abstand gegeben. Typische Messobjekte sind Spiegel, Linsen oder strukturierte Halbleiter, also alle Objekte mit optisch glatten Oberflächen. In Abbildung 9 ist ein Signal abgebildet, das an einer solchen Oberfläche aufgenommen wurde. Das linke Diagramm zeigt das Ergebnis eines kompletten Tiefenscans. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Modulation sehr viel ausgeprägter ist als im Fall von Abbildung 7. Im rechten Diagramm ist wieder der Bereich, in dem die Interferenzen auftreten, vergrößert dargestellt. Bei solchen Signalen wird zuerst eine Hüllkurvenauswertung vorgenommen. Unter Berücksichtigung der Phase lässt sich das Maximum abhängig von dem Messobjekt um ca. zwei Zehnerpotenzen genauer bestimmen, woraus eine höhere Auflösung resultiert.

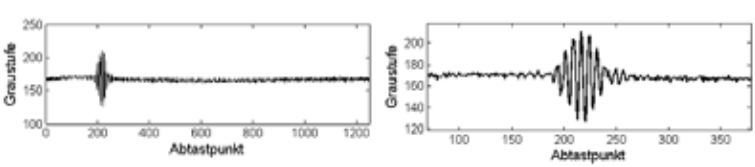


Abb. 9: Signal mit großem Signal-Rausch-Abstand

Abbildung 10 zeigt eine konvexe Glaslinse, die ein typisches Beispiel für ein Objekt ist, das mit Phasenauswertung gemessen werden kann. Das obere Diagramm auf der rechten Seite des Bildes zeigt einen Schnitt durch die Oberfläche der Linse. Zieht man nun die konvexe Form ab, so bleibt, wie im darunter liegenden Diagramm zu sehen, die Rauheit übrig. Bei Mittelung über mehrere Messungen liegt die Standardabweichung im Subnanometerbereich.

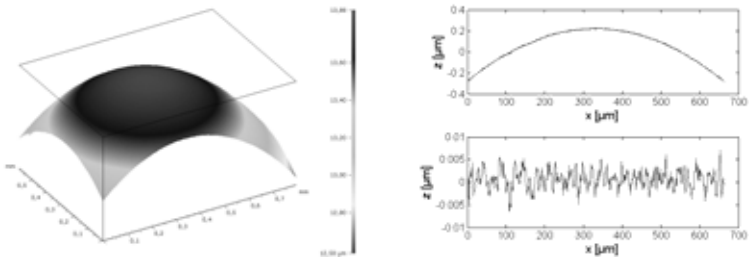


Abb. 10: Beispiel: Topographieaufnahme einer Linsenoberfläche

3.3 Messungen an Kanten

Die Messung an scharfen Kanten, deren Stufenhöhe kleiner als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle ist, stellt für die Weißlichtinterferometrie eine besondere Herausforderung dar und soll im Folgenden erläutert werden. In Abbildung 11 sind die an einer in Silizium geätzten Kante gemessenen Signale dargestellt. Die Pfeile zeigen auf den Bereich des Messobjektes, an dem sie aufgenommen sind. Das obere und das untere Diagramm lassen sich eindeutig den beiden unterschiedlichen Höhenniveaus zuordnen. Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Lagen der Maxima ist hier die Einhüllende mit eingezeichnet. Betrachtet man das Signal, dass genau an der Kante gemessen wird, so lässt sich eine Überlagerung der Signale von unterem und oberem Höhenniveau beobachten.

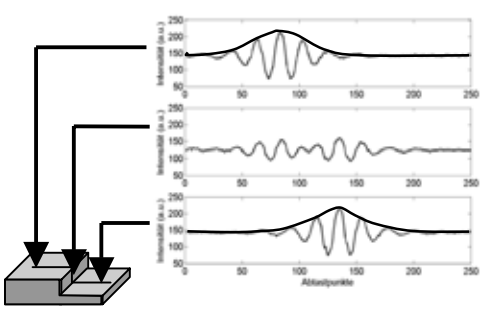


Abb. 11: Signalüberlagerung an Kanten

Die Hüllkurvenauswertung im oberen Diagramm von Abbildung 12 liefert für den beschriebenen Fall Höhenwerte, die entweder zu dem unteren oder dem oberen Niveau gezählt werden können. Allerdings kommt es an der Diskontinuität zu Über- und Unterschwingern. Diese Verfälschung des Signals, die als „Batwing-Effekt“ (HARASAKI 2000) bezeichnet wird, führt zu einer Überzeichnung der Feinstruktur. Das mittlere Diagramm in der Abbildung 12 zeigt das Messergebnis der gleichen Stufe, jedoch mit einer anschließenden Phasenauswertung. Hier wird die Kante ohne den „Batwing-Effekt“ gemessen. Allerdings kann es bei der Phasenauswertung durch die Überlagerung der beiden Signale zur Bildung einer Mischphase kommen, die zu einem virtuellen Messpunkt zwischen den bei-

den Höhenniveaus führt. Die beiden unteren Diagramme zeigen den Unterschied zwischen Hüllkurven- und Phasenauswertung nochmals im Detail.

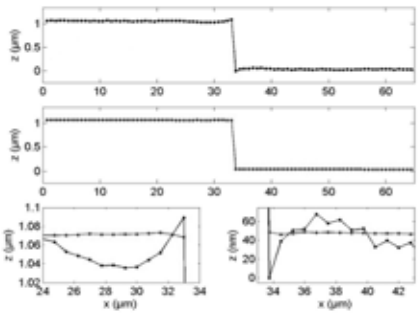


Abb. 12: „Batwing-Effekt“ an einer Stufe

4 Ausblick – Liniensensor zur Vermessung von zylindrischen Objekten

Die oben dargestellten Messergebnisse zeigen, dass sich das Messsystem MarSurf WS1 zur 3D-Topographie-Erfassung von einer ganzen Reihe optisch rauer sowie optisch glatter Oberflächen eignet, wobei das Material keine wesentliche Rolle spielt. Einen Sonderfall stellen hierbei zylindrische Messobjekte dar, die über den gesamten Umfang zu vermessen sind. Ein aktuelles Anwendungsbeispiel aus der Automobilindustrie ist die Erfassung der Oberflächentopographie von Einspritznadeln. Allein aufgrund des mikroskopischen Messfeldes gestattet das vorgestellte Messsystem keine hohen Messgeschwindigkeiten für den beschriebenen Anwendungsfall. Aus diesem Grund verfolgt die Firma Mahr GmbH in Zusammenarbeit mit der Fakultät Naturwissenschaften und Technik der Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen das Ziel, einen neuartigen, linienförmig messenden Sensor zur schnellen Erfassung der Oberflächentopographie von zylindrischen Objekten zu entwickeln.

Im Gegensatz zum eingangs beschriebenen Mirau-Objektiv wird ein einfaches Interferometer nach A. Michelson aufgebaut (vgl. Abb. 1). Um Messzeiten von wenigen Sekunden zu realisieren, erfasst eine Zeilenkamera in einem Messvorgang eine ganze Linie achsparallel entlang der Mantelfläche des Messobjekts. Dazu wird das von der Weißlichtquelle emittierte Licht auf einer Linie von ca. 10 mm Länge fokussiert, mit der sowohl das Objekt als auch der Referenzspiegel beleuchtet wird. Der Tiefenscan wird dadurch erreicht, dass der Spiegel im Referenzarm mithilfe eines geregelten Piezoaktors innerhalb eines Tiefenmessbereichs von 50 µm periodisch verfahren wird. Die mit der Bewegung des Referenzspiegels synchronisierte Signalaufnahme erfolgt mit einer Zeilenkamera, deren Zeilenrate ausreichend hoch ist, sodass das an jedem Kamerapixel entstehende Weißlicht-Interferogramm erfasst und in die Höhenlage der entsprechenden Objektpunkte umgerechnet werden kann. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Zielparameter des Sensors zusammengefasst.

Tabelle 1: Zielparameter des Liniensensors

Pixelanzahl Kamera	1 × 1000
Arbeitsabstand	> 10 mm
Lateraler Messbereich	10 mm × 10 µm
Laterale Auflösung	(10 – 20) µm
Tiefenmessbereich	50 µm (mit 500 Abtastschritten)
Tiefenauflösung	< 10 nm
Messgeschwindigkeit	50 kHz Zeilenrate

Aus den Zielparametern des Sensors ergeben sich hohe Anforderungen an das Piezosystem, das Bilderfassungssystem sowie die Beleuchtung. So muss beispielsweise der Piezoaktor in der Lage sein, einer vorgegebenen Fahrkurve ohne wesentliche Regelabweichung zu folgen, um somit eine äquidistante Abtastung des Weißlicht-Interferogramms zu gewährleisten. Um eine angemessene Anzahl von Abtastwerten zu erhalten, ist eine Kamera mit einer Zeilenrate bis 50 kHz vorgesehen. Damit auch bei derart kurzen Integrationszeiten ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand eingehalten werden kann, ist ebenfalls eine effiziente Ausleuchtung des Messfeldes mit hoher Bestrahlungsstärke vorgesehen, wobei als Strahlungsquelle Leuchtdioden aufgrund ihrer kompakten Bauform geeignet erscheinen. Abbildung 13 zeigt einen bereits realisierten Testaufbau, mit dem Untersuchungen zu den o. a. Punkten durchgeführt werden sollen.

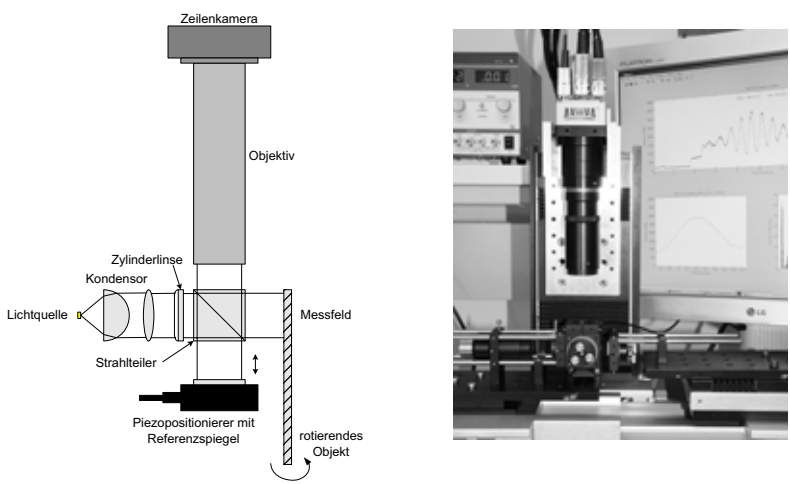


Abb. 13: Einfacher Testaufbau zur Systemcharakterisierung des Liniensensors

Literatur

Geburtig, A. (2002): *Zerstörungsfreie Gleitsystemanalyse an der einkristallinen Hochtemperaturlegierung SC16 bei mittlerer Orientierung der Zugachse.* Dissertation an der TU Berlin, Berlin

Groot, P. de, Lega, X. C. de, Kramer, J. & M. Turzhitsky (2002): *Determination of fringe order in white-light interference microscopy* Applied Optics Vol. 41, No. 22. 4517-4578

Groot, P. de & X. C. de Lega (2004): *Signal modelling for low-coherence height-scanning interference microscopy* Applied Optics, Vol. 43, No. 25. 4821-4830

Harasaki, A. & J. C. Wyant (2000): *Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry.* Applied Optics, Vol. 39, No. 13. 2101-2106

Hecht, E. (2001): *Optik.* 3. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München

Koch, A. W., Ruprecht, M. W., Toedter, O. & G. Häusler (1998): *Optische Messtechnik an technischen Oberflächen.* Expert Verlag, Renningen-Malmsheim

Niehues, J. (2004): *Messtechnische Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten und des Optimierungspotenzials eines kompakten Weißlichtinterferometers zur 3D-Erfassung von Oberflächentopografien.* Diplomarbeit an der Fachhochschule HHG, Göttingen

Entwicklung des Streifenprojektionssystems „3D-Kamera“ – von der Idee über das Produkt zum industriellen Einsatz

Achim GESIERICH, Thorsten BOTHE und Wansong LI

Einleitung

Am Bremer Institut für angewandte Strahltechnik (BIAS) wurde ein neuartiges System zur 3D-Formerfassung auf Basis der Streifenprojektion entwickelt (BOTHE 2004). Dieses Basissystem wurde von den Vereinigten Elektronik Werkstätten Bremen (VEW) in ein marktreifes Produkt überführt. In diesem Artikel werden die dazu vorgenommenen Maßnahmen vorgestellt und der Einsatz der 3D-Kamera im industriellen Umfeld an Messbeispielen vorgestellt.

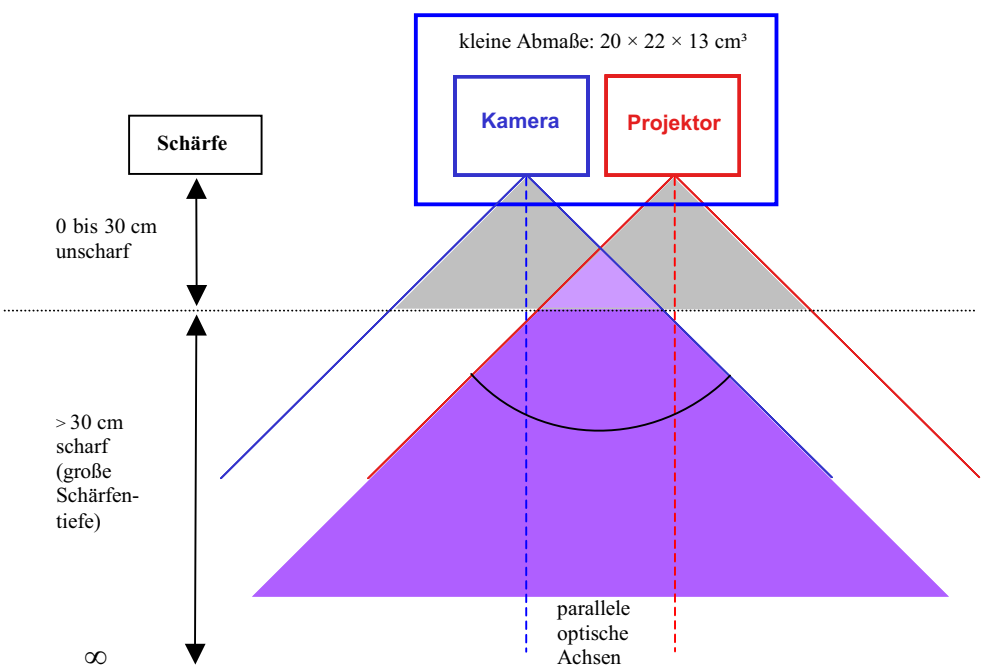


Abb. 1: Aufbaukonzept 3D-Kamera mit den Haupteigenschaften

1 Systemkonzept

In Abbildung 1 ist das Aufbaukonzept der 3D-Kamera mit parallelen optischen Achsen, großem Öffnungswinkel des Messraumes, einem großen Schärfetiefenbereich und daraus resultierend einem großen nutzbaren Messvolumen zu sehen. Das Konzept ist detailliert in BOTHE (2004) dargestellt.

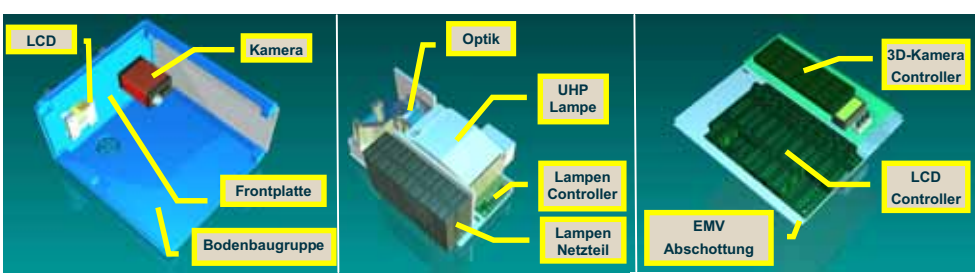
2 Technische Realisierung

2.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau der 3D-Kamera wurde weitestgehend aus gefrästen Aluminium-Elementen verwirklicht. Dabei wurde die 3D-Kamera in einzelne Baugruppen unterteilt. Jede einzelne Baugruppe ist einzeln vormontierbar und leicht zu wechseln. Dieses erleichtert die Montage, Wartung und spätere Reparatur der 3D-Kamera. Folgend werden exemplarisch Frontplatte und Bodenbaugruppe, die Beleuchtungsbaugruppe und die Steuerelektronik näher beschrieben.

2.1.1 Frontplatte/Bodenbaugruppe

Die mechanische Triangulationsbasis bildet die Frontplatte. An ihr sind sowohl die Kamera als auch das zur Streifenerzeugung dienende LCD befestigt (Abb. 2a). Da bereits kleinste Veränderungen der Geometrie zwischen Kamera und LCD große Auswirkungen auf die Genauigkeit des Systems haben, wurde die Frontplatte sehr stabil und verwindungssteif aus einem Stück gefräst. Dadurch ist die Langzeitstabilität der Kalibrierung gegeben. Die Frontplatte ist mit der Bodenbaugruppe fest verschraubt. Mit der Bodenbaugruppe werden alle anderen Baugruppen verbunden, sodass ein steifes Gesamtsystem entsteht.



a) b) c)

Abb. 2: Baugruppen: a) Front- und Bodenbaugruppe der 3D-Kamera, b) Beleuchtungsbaugruppe, c) Steuerelektronik mit elektromagnetischer Abschirmung

2.1.2 Beleuchtungsbaugruppe

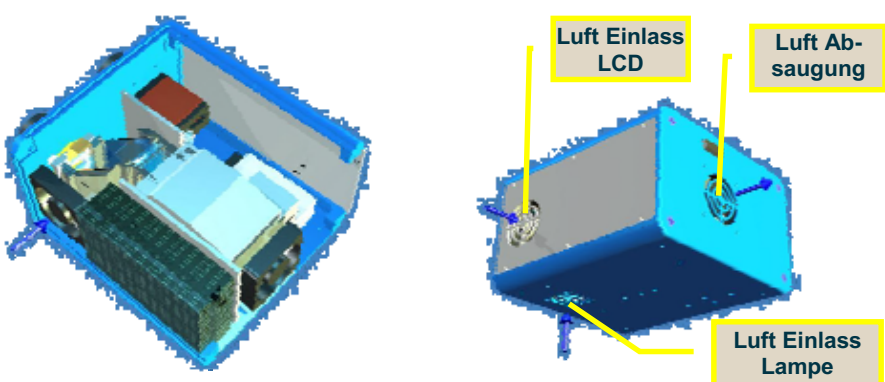
In der Beleuchtungsbaugruppe (Abb. 2b) sind sowohl die optischen als auch die elektronischen Bauteile zur Beleuchtung des LCD zusammengefasst. Optische Bauteile sind: UHP-Lampe, Aufbereitungsoptik (Homogenisierer, Filter, Polarisatoren) und Spiegel zur Umleitung des Lichtes. Elektrische Bauteile: Lampencontroller zum Starten und Regeln des Lichtbogens der UHP-Lampe, Lüfter zum Kühlen der Lampe und das Lampennetzteil zur Stromversorgung der Lampe. Die Beleuchtungsbaugruppe wird mit lediglich drei Verschraubungen an der Bodenplatte montiert (Abb. 3a). Damit ist eine leichte Justage der Lampenbaugruppe vor dem LCD möglich.

2.1.3 Steuerelektronik

Die Steuerelektronik (Abb. 2c) der 3D-Kamera besteht im Wesentlichen aus einem Controller zur Ansteuerung des LCD und einem zweiten Controller, der alle wesentlichen Funktionen der 3D-Kamera wie Temperatursteuerung, Lampenüberwachung, Lampenlebensdauer, Betriebsspannungen überwacht und steuert. Die beiden Controller sind im oberen Teil des Gehäuses gegen elektromagnetische Störungen, vor allem der UHP-Lampe, abgeschottet untergebracht. Die Bedienung der 3D-Kamera erfolgt über drei Taster und ein zweizeiliges Display.

2.2 Wärme-Management

Um ein stabiles Wärmegleichgewicht in der 3D-Kamera zu gewährleisten, wurde ein Konzept zur gezielten Abkühlung einzelner Komponenten und dem Abtransport der warmen Luft erarbeitet. Problematisch hierbei war vor allem das LCD, da dieses die hohe Lichtleistung des Projektors nur durch eine aktive Kühlung bewältigen kann.



a) b)

Abb. 3: Luftführung: a) gezielte Kühlung des LCD, b) Luftführung von vorne nach hinten

2.2.1 Gezielte Kühlung

Zur aktiven Kühlung des LCD wird durch einen Lüfter ein Luftstrom über das LCD geleitet (Abb. 3a). Durch den inneren Aufbau des Gehäuses wird dieser nach hinten umgeleitet und überstreift dabei die gesamte Lampenelektronik. Ein zweiter Lüfter saugt von unten kalte Luft an (Abb. 3b) und bläst diese durch die Aufbereitungsoptik zur UHP-Lampe, die so von einem ständigen kalten Luftstrom umspült wird. Ein dritter Lüfter saugt im hinteren Bereich die erwärmte Luft nach hinten ab und befördert sie nach draußen. Bei diesem Belüftungskonzept wurde darauf geachtet, dass die Luftführung von vorne nach hinten geschieht, sodass die Frontplatte keinen großen Wärmeschwankungen und damit Ausdehnungen unterworfen wird. Zudem wird die Wärme von der Kamera weg befördert, wodurch sich deren Rauschen vermindert.

2.2.2 Spektraler Beschnitt

Um eine übermäßige Erwärmung des LCD zu vermindern, wurde ein spektraler Beschnitt des Lichtes der UHP-Lampe durchgeführt (Abb. 4). Dabei wurden Spektralfilter so gewählt, dass die Kamera in ihrem empfindlichsten Bereich arbeitet. Es wurde ein Blaufilter mit Durchlass ab ca. 450 nm, und ein Infrarotfilter mit Durchlass bis ca. 700 nm verwendet.

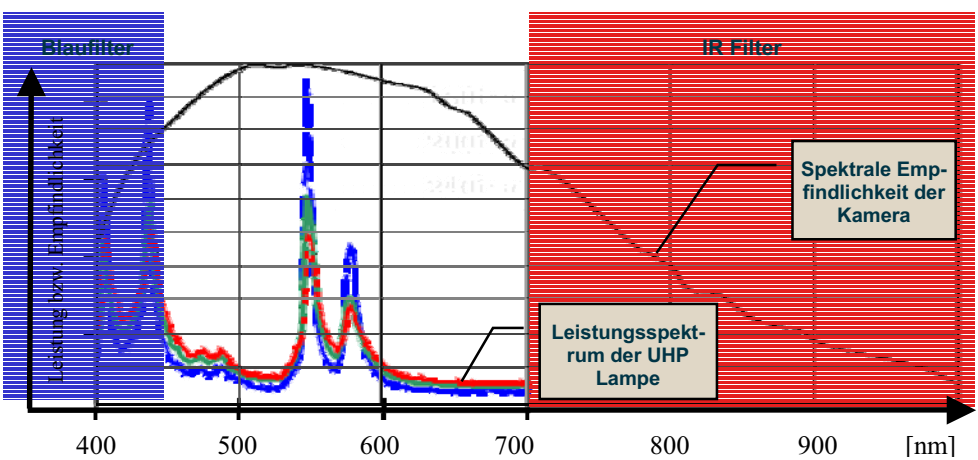
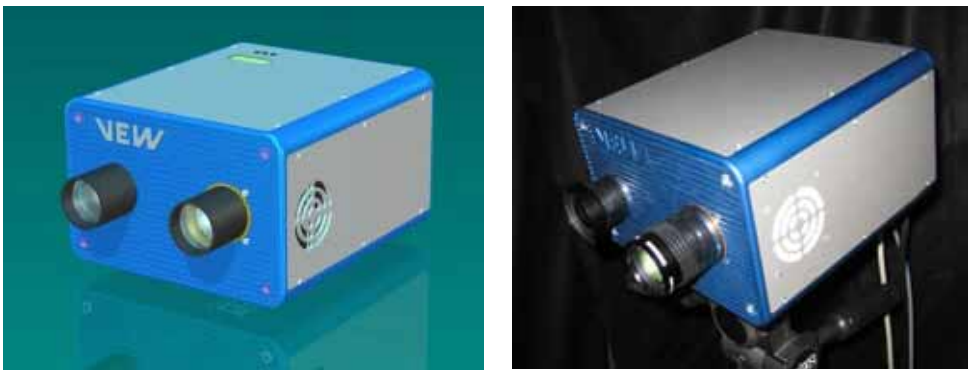


Abb. 4: Spektraler Beschnitt: Lampenspektrum, Filterbereich, Kameraempfindlichkeit

2.3 Design/Schnittstellen

Für die Computerschnittstellen der 3D-Kamera wurde auf standardisierte, weit verbreitete Schnittstellen geachtet. Diese sollten digital und ohne aufwändige Einsteckkarten arbeiten. Für den Projektor wurde das Digital Video Interface (DVI), für die Kamera die Firewire-Schnittstelle ausgewählt. Beide Schnittstellen sind weit verbreitet und heute in vielen Laptops zu finden. Dieses unterstützt die Mobilität des Systems, da nur die 3D-Kamera und ein Laptop für die Messung gebraucht werden.



a) b)

Abb. 5 3D-Kamera: a) Modell; b) einsatzfähiges Gerät

Vor dem Bau der 3D-Kamera wurde ein komplettes 3D-Modell der Kamera erstellt, aus dem sämtliche Bauzeichnungen abgeleitet wurden (Abb. 5a). Für ein hochwertiges Design der 3D-Kamera wurden gebürstete und eloxierte Oberflächen sowie abgerundete Kanten für das Gehäuse gewählt (Abb. 5b).

3 Messbeispiele

In bisherigen Artikeln (BOTHE 2002, BOTHE 2004), wurden bereits die speziellen Anwendungsfelder vorgestellt, die nur mit dem Konzept der 3D-Kamera zugänglich sind, wie:

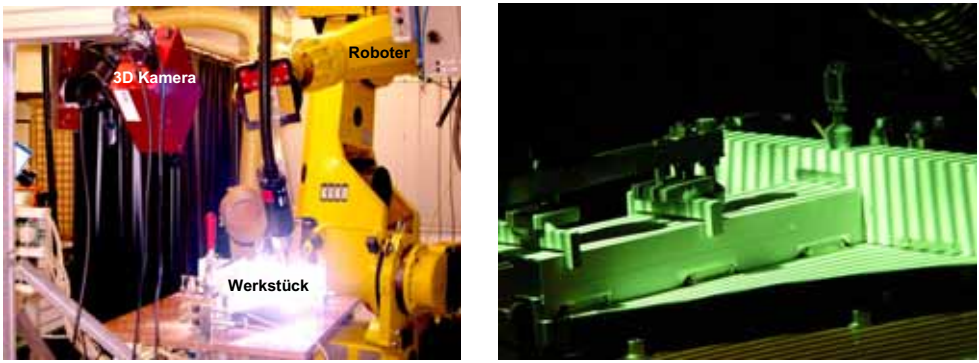
- Komplettszenenvermessung
- Vermessung von Kavitäten und Objekten mit starken Gradienten
- Messung in beengten Verhältnissen
- Messung großer Flächen auf kurzen Abständen
- Vermessung durch Beobachtungsfenster hindurch

Nun folgt ein Beispiel, dass die Fähigkeit der 3D-Kamera nutzt, minimale Abschattungen auch bei Objekten mit starken Gradienten zu liefern.

3.1 Messung des Werkstückverzuges eines Aluminium-Schweißbauteils innerhalb einer Schweißroboter-Anlage

Folgend wird der Einsatz der 3D-Kamera zur Vermessung des Schweißverzugs eines Aluminium-Fahrzeugteils gezeigt. Ein Schweißroboter fährt mit dem Schweißarm an definierte Stellen des Werkstückes, um die einzelnen Komponenten miteinander zu verschweißen (Abb. 6a).

Die 3D-Kamera wurde zur flächigen Vermessung des Bauteiles in der Fertigungshalterung vor und nach der Verschweißung eingesetzt.



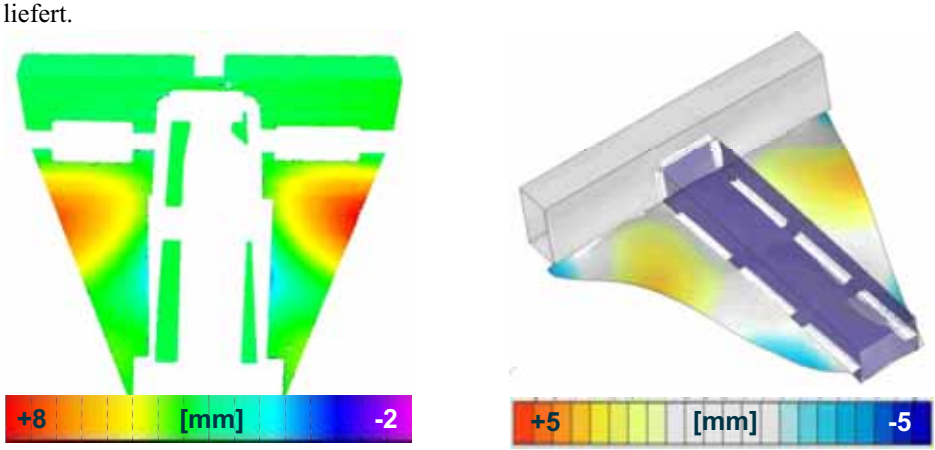
a) b)

Abb. 6: a) Aufbau in der Schweißkabine und Schweißvorgang; b) Messvorgang am Werkstück mit minimalen Abschattungen

Die Daten der Messung (Abb. 7a) wurden den Daten der FEM-Simulation (Abb. 7b) gegenübergestellt und ausgewertet. Durch den Vergleich dieser Datensätze kann der gesamte Prozess optimiert werden.

Bei dem gezeigten Beispiel passen viele Bereiche der Messung mit der Simulation überein, andere Bereiche stimmen weniger überein. Durch Anpassung der Simulation wird eine Verbesserung der simulierten Daten und der Modellparameter für die Simulation gewonnen.

Beachtenswert ist bei den Messdaten in Abbildung 7a die geringe Abschattung bei nur einer Messposition, die sämtliche benötigte Flächenelemente mit einer einzigen Messung liefert.



a) b)

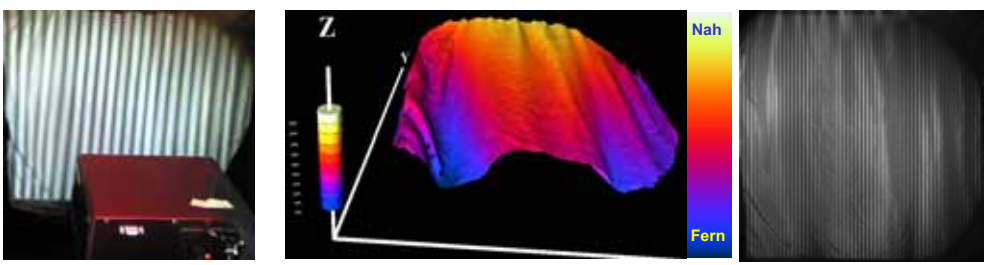
Abb. 7: Schweißverzug: a) aus Vermessung mit 3D-Kamera, b) aus FEM-Simulation

3.2 Anwendungen mit Inverser Musterprojektion

Die Inverse Musterprojektion nutzt die Fähigkeit des Projektors, beliebige Muster zu projizieren (LI 2003). So ist es z. B. möglich, an einem Objekt angepasste Streifen zu projizieren oder beliebige Informationen optisch auf ein Objekt zu bringen.

3.2.1 Deformationsverfolgung mit Videorate

Werden als zu invertierendes Muster Streifen verwendet, so gelangt man zur inversen Streifenprojektion mit an das Objekt angepassten Streifen. Mit diesen Streifen kann eine Defektdeformation mit nur einem Kamerabild gemessen werden. Hat man kontinuierliche Objektdeformationen, so können diese mit derselben Methode für jedes Bild einer Videoserie ausgewertet werden, wodurch sich eine Verformungsserie ergibt.



a) b) c)

Abb. 8: Dynamische Formerfassung eines Seitentuches: a) Messsituation, b) gemessene Form der Tuchverwerfungen, c) Kamerabild der inversen Streifen

In Abbildung 8 ist die dynamische Messung der Bewegung eines Tuches dargestellt. Die 3D-Kamera wurde vor dem Objekt positioniert (Abb. 8a) und die Objektform vermessen (Abb. 8b). Auf Basis der Messdaten wurde das inverse Projektionsmuster erzeugt, sodass die Kamera gerade Streifen aufnimmt (Abb. 8c). Mit dem projizierten inversen Streifenmuster ist dann eine Deformationsmessung mit jedem Einzelbild der Kamera möglich, indem lediglich die Abweichungen zu den ursprünglich geraden Streifen ausgewertet werden.

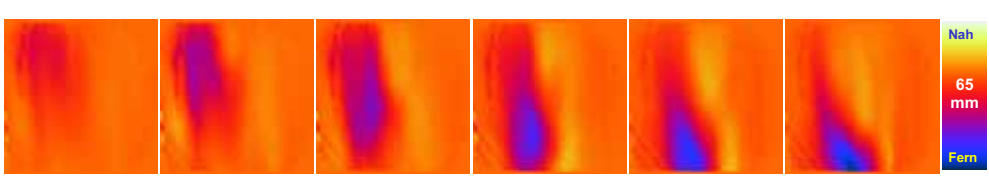


Abb. 9: Ausgewertete Verformungsserie: beginnende Verformung der Flagge mit 0,13 Sekunden Zeitabstand (Dynamikbereich: 65 mm)

Die Kamera wurde im Videobetrieb mit 15 Hz zur Aufnahme einer Videoserie benutzt, während das Tuch angeblasen wurde.

Die Bewegung des Tuches wurde über die in BURKE (2002) beschriebenen Methoden zunächst in Phasendifferenzen, dann über Differenzanalyse in Absolutphasendifferenzen und mit dem Geometriemodell der 3D-Kamera schließlich in metrisch skalierte Verformungen umgesetzt.

Eine Auswahl von Zuständen dieser Serie ist in Abbildung 9 dargestellt. Die gewählte Videorate ist weit von „High-Speed“ entfernt. Das demonstrierte Prinzip ist aber von der Aufnahmerate unabhängig, sodass mit einer Hochgeschwindigkeitskamera auf diese Weise tatsächlich schnelle Vorgänge 3-dimensional aufgenommen werden können.

3.2.2 Optisches Markieren (Augmented Reality)

Werden als zu invertierende Muster Informationen für den Benutzer auf das Objekt aufgebracht, so gelangt man zur Augmented Reality.

In LI (2003) wurde bereits gezeigt, wie erkannte Material- oder Formfehler mithilfe der Inversen Musterprojektion direkt auf dem Objekt markiert werden können. Die inverse Projektion ist aber generell geeignet, sämtliche Arten von Hilfsstrukturen auf ein Objekt zu bringen.

a) b)

Abb. 10: Virtuell erweiterte Realität (AR, Augmented Reality) in der Fertigung: a) Mess- und Einsatzsituation, b) virtuell auf das Objekt aufgebrachte Montageinformationen: Drehmomente, Farben, Hilfsmarkierungen, individuelle Kundenspezifikationen

In Abbildung 10 wird eine Fertigungssituation im Automobilbau nachgestellt, bei der benötigte Informationen per Inverser Musterprojektion direkt auf das Objekt projiziert werden. Der Vorteil gegenüber Lösungen mit vor die Augen zu positionierenden Virtual-Reality-Displays ist, dass die Informationen ortsfest mit dem Objekt verbunden sind und somit der Aufwand, z. B. Kopfbewegungen zu kompensieren, wegfällt. Zudem wird keine hinderliche zusätzliche Ausrüstung wie VR-Helm oder tragbarer Computer benötigt. Eine möglicherweise störende Abschattung durch die Benutzer kann leicht durch Benutzung mehrerer Projektoren umgangen werden, da die Inverse Musterprojektion es erlaubt, aus verschiedenen Richtungen exakt dasselbe definierte Muster zu erzeugen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde die Entwicklung der 3D-Kamera zu einem industrietauglichen Produkt gezeigt. Durch den besonderen Aufbau und der damit in Zusammenhang stehenden Eigenschaften der 3D-Kamera ist ein Nischenprodukt für eine Reihe von Anwendungen entstanden, die mit Standardsystemen nicht zugänglich sind. Durch den modularen Aufbau sind schneller und kostengünstiger Bau sowie Wartung und Reparatur der 3D-Kamera gewährleistet. Durch einfache und weit verbreitete Schnittstellen ist die 3D-Kamera mobil mit einem Laptop zu betreiben. Die gezeigten Beispiele verdeutlichen die Leistungsfähigkeit des Produktes.

Eine der nächsten Schritte wird die Anbindung der 3D-Kamera an kommerzielle Softwarelösungen mit weiterführenden Bearbeitungsmöglichkeiten für die gewonnenen 3D-Daten sein. Die im Zusammenhang mit der 3D-Kamera entwickelte Sichtstrahlkalibrierung (SCHULTE 2006) soll in Zukunft optional der 3D-Kamera beigestellt werden, sodass eine Kalibrierung beim Kunden möglich wird und spezielle Anpassungen vor Ort durchgeführt werden können.

5 Danksagung

Vielen Dank für die Hilfe bei den Messungen an Michael Schulte sowie Steffen Neumann für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung der Schweißexperimente.

Literatur

Bothe, T., Gesierich, A., Kopylow, C. von & W. Jüptner (2004): *3D-Kamera – ein miniaturisiertes Streifenprojektionssystem zur Formerfassung.* In: Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Tagungsband der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 38-47

Bothe, T., Osten, W., Gesierich, A. & W. Jüptner (2002): *Compact 3D-Camera.* Proc. SPIE Vol. 4778. 48-59

Bothe, T., Li, W., Osten, W. & W. Jüptner (2002): *Generation and evaluation of object adapted inverse fringe patterns*. International Symposium on Photonics in Measurement, VDI-Berichte 1694, 299-304

Bothe, T., Li, W. & W. Jüptner (2004): *Object Adapted Pattern Projection – part II: applications.* OLE, prep. for 2004

Bothe T., Li, W., Kopylow C. von & W. Jüptner (2003): *Erzeugung und Auswertung von objektangepassten inversen Projektionsmustern.* tm-Technisches Messen, 70 (2003) 2. 99-103

Burke, J., Bothe, T., Osten, W. & C. Hess (2002): *Reverse engineering by fringe projection*. Proc. SPIE Vol. 4778. 312-324

Li W., Bothe T. & W. Osten (2003): *Object Adapted Pattern Projection – part I: generation of inverse patterns.* Opt. and Lasers in Eng., accepted to be published in 2003

Li, W., Bothe, T., Kalms, M., Kopylow, C. von & W. Jüptner (2003): *Applications for Inverse Pattern Projection*. Proc. SPIE Vol. 5144

Schulte, M., Bothe, T., Li, W., Gesierich, A., Kopylow, C. von & W. Jüptner (2006): *Hochauflösende Sichtstrahlkalibrierung für optisch abbildende Systeme am Beispiel Streifenprojektion.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 130-137

Messtechnische Bewertung von Schleifwerkzeugoberflächen auf Basis der konfokalen Mikroskopie

Heinz-Wolfgang LAHMANN und Marius STÖCKMANN

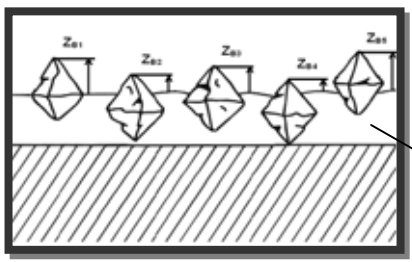
1 Technische Problemstellung

Galvanisch gebundene Schleifwerkzeuge weisen, wie auch Werkzeuge mit Kunstharz- und Keramikbindungen, im Allgemeinen einen Schleifbelag mit nur einer Schicht Schleifkörnung auf. Die Belagstärke ist abhängig von dem Einbindungsprozess der Schleifkörner in das Bindungsmaterial (z. B. Nickel) und liegt zumeist im Bereich zwischen 30 % und 60 % der verwendeten mittleren Korngröße. Da diese Schleifwerkzeuge aber nicht abgerichtet werden können, ist die Einhaltung der für die Bearbeitungsaufgabe notwendigen Merkmale der Oberflächentopographie von ganz entscheidender Bedeutung. Die Aufgabe der Galvanikbindung besteht einerseits darin, die hochwertigen Diamant- bzw. CBN-Körner bis zum Erreichen des Verschleißgrenzbereiches festzuhalten und andererseits einen Spanraum für die Spanabfuhr zu bilden. Bei der galvanischen Bindung wird die Körnung mittels Elektrolyse z. B. auf eine elektrisch leitende Scheibe durch Ni- oder Cr- Niederschlag eingebettet. Dieser Fertigungsprozess trägt in sich statistischen Charakter, der sich entsprechend auch auf die zu prüfenden Qualitätsmerkmale auswirkt. Zur möglichst umfassenden Charakterisierung der Schleifbeläge werden verschiedene Merkmale genutzt. Zu den wichtigsten Größen gehören neben der Bindungshärte die Korngröße, die Kornkonzentration, die statische und kinematische Schneidenzahl sowie der kinematische Schneidenabstand. Die beiden letztgenannten Größen beziehen bereits die Dynamik des Prozesseinsatzes mit ein. Die Bestimmung der einzelnen Oberflächenmerkmale erfolgt oft noch auf manueller, rein visueller Basis unter Nutzung einfacher optischer Systeme. Hierbei spielt die Erfahrung der einzelnen Prüfer eine mitentscheidende Rolle bei der Ermittlung des entsprechenden Merkmals. Auch auf indirekte Art und Weise lässt sich eine Aussage über den Zustand des Schleifbelages ermitteln, wie sie z. B. durch die Bestimmung der Wirkrautiefe am bearbeiteten Werkstück erfolgt [1], [2]. Zwei weitere relevante Merkmale zur Charakterisierung der Oberflächentopographie sind der so genannte „Mittlere Kornüberstand“ und die „Kornspitzenverteilung“. Die Möglichkeiten der messtechnischen Bewertung dieser beiden Oberflächenkenngrößen werden in diesem Beitrag näher ausgeführt.

2 Messverfahren

Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Messsystems waren Forderungen aus der Schleifwerkzeugindustrie nach einem berührungslos und verschleißfrei arbeitenden Gerätesystem, welches es gestattet, die oben genannten Kenngrößen „Mittlerer Kornüberstand“ und „Kornspitzenverteilung“ an galvanisch gebundenen Schleifwerkzeugen in einem automatisch ablaufenden Messprozess zu bestimmen [3].

In Abbildung 1 ist die Definition des mittleren Kornüberstandes dargestellt.



$$K_B = \frac{1}{N} * \sum_{n=1}^{N} z_{Bn}$$

Abb. 1: Definition der Kornbindung und schematischer Aufbau eines galvanisch gebundenen Schleifwerkzeugs

K_B – Mittlerer Kornbindungsüberstand

N – Anzahl der Körner

Z_{Bn} – Kornbindungsüberstand des Korns n

Das vorgegebene Korngrößenspektrum der zu prüfenden Schleifwerkzeuge lag in einem Bereich von D46 und D501 mit einer Kornform zwischen 0,5 und 1. Ausgehend von dem zu entwickelnden Messverfahren war zu untersuchen, bis zu welchen Oberflächenkrümmungen (Hauptradius, Profilradiensprünge, konvexe/konkave Form) die Werkzeugoberflächen messtechnisch erfassbar sind und wie sich verschiedene Einflussgrößen (Korngrößenstreuung, Reflexionsvermögen, Körnungstyp, Kornverteilung, Art der Bindung) auf das Mess- bzw. Prüfergebnis auswirken.

Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten stand die Aufgabe, ein geeignetes Messprinzip auszuwählen, mit dem berührungslos und mit einer vertretbaren Mess- und Auswertezeit die beiden Prüfmerkmale mit einer Messgenauigkeit von ± 2 µm erfasst werden können. Für die Auswahl wurden zwei optisch arbeitende Verfahren in die näheren Betrachtungen einbezogen. Das waren einerseits die Weißlichtinterferometrie und andererseits das konfokale Messprinzip, deren wesentlichen Verfahrenspunkte nachfolgend kurz erläutert werden.

2.1 Weißlichtinterferometrie (WLI)

Bei der WLI nutzt man die geringe Kohärenzlänge von wenigen Mikrometern einer gewöhnlichen Weißlichtquelle (z. B. Halogenlampe). Im Gegensatz zu einem „klassischen" Interferometer, welches total oder partiell kohärentes Licht, z. B. Laserlicht, verwendet und bei dem aufgrund der Periodizität der Lichtwellen nur innerhalb einer halben Wellenlänge eine eindeutige Zuordnung erfolgen kann, interferieren die Wellenzüge bei einem WLI im Bereich eines begrenzten Phasenversatzes. Bei der entsprechenden optischen Anordnung hat das Interferenzsignal dann den größten Amplitudenumfang, wenn die optischen Weglängen von Referenz- und Objektwelle innerhalb einer Wellenlänge liegen.

Das Prinzip eines Interferometers ist in Abbildung 2 ist dargestellt. Die von einer Lichtquelle ausgehende Strahlung wird an einem Strahlteiler in zwei zueinander senkrechte Strahlen aufgeteilt. Der eine Strahl trifft auf einen festen und der andere Strahl auf einen verschiebbaren Spiegel. Beide Strahlen werden zurückreflektiert und nach Durchgang bzw. Reflexion an dem halbdurchlässigen Spiegel (Strahlteiler) zusammengeführt. Aufgrund der unterschiedlich zurückgelegten Weglängen der Strahlen kommt es zu Interferenzen, die auf dem Schirm abgebildet werden.

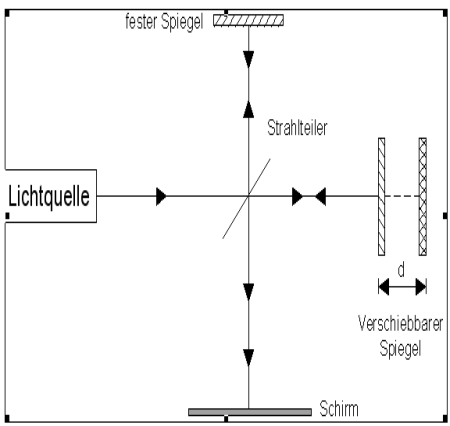


Abb. 2: Prinzipdarstellung eines Interferometers (Michelson) (Quelle: GFE)

Bedingt durch die geringe Kohärenzlänge (wenige µm) des weißen Lichtes entsteht bei der WLI ein so genanntes Korrelogramm, welches in Abbildung 3 dargestellt ist. Wenn die zurückgelegten Wege der beiden Strahlen gleich sind, so entsteht die maximale Amplitude (Intensität). Man erhält die Z-Position (Höheninformation) über die Ermittlung des Maximums der Amplitude in Abhängigkeit der Scanposition.

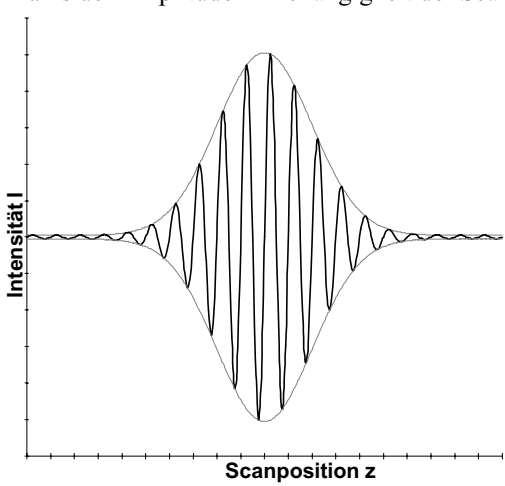


Abb. 3: Korrelogramm (Quelle: GFE)

2.2 Konfokale Mikroskopie

Bei der konfokalen Mikroskopie wird die geringe Tiefenschärfe eines Objektivs mit hoher numerischer Apertur ausgenutzt. Nur die Objektbereiche, die innerhalb des Tiefenschärfebereiches liegen, werden scharf, d. h. mit relativ starkem Kontrast abgebildet (Abb. 4). Durch Auswertung der Differenz (d. h. des Kontrastes) der Grauwerte von einer Bildfolge, bezogen auf jeweils ein und denselben Bildpunkt eines CCD-Matrix-Sensors, wird die Objektebene, in der der Bildpunkt die maximale Schärfe hat, ermittelt. Dieses Verfahren setzt jedoch eine kontrastbildende Eigenstruktur der zu messenden Objektfläche voraus.

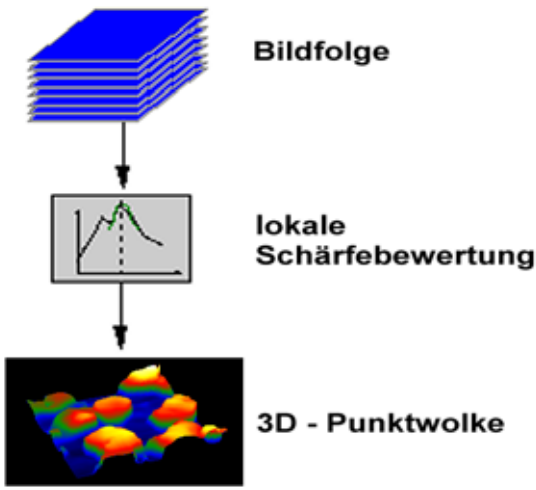


Abb. 4: Verfahrensablauf der konfokalen Mikroskopie (Quelle: GFE)

3 Untersuchungsergebnisse

Um eine statistisch gesicherte Angabe über den mittleren Kornüberstand und der Kornspitzenverteilung erzielen zu können, ist es notwendig, eine ausreichende Anzahl von Schleifkörnern für die Berechnung der beiden Prüfmerkmale einzubeziehen. Die Anzahl (notwendiger Stichprobenumfang) hängt dabei von der Gesamtkornzahl (Umfang der Grundgesamtheit) auf der Schleifscheibe ab und berechnet sich näherungsweise nach folgender Formel [4].

$$n = \frac{Z^2 \cdot N \cdot \sigma^2}{\left(\Delta\mu^2\right) \cdot (N-1) + Z^2 \cdot \sigma^2} \qquad (1)$$

n – Stichprobenumfang

Z^2 – Standardnormalverteilung

N – Umfang der Grundgesamtheit

σ^2 – Varianz der Grundgesamtheit

$\nabla\mu$ – Absoluter Fehler

Da mit der WLI und auch der konfokalen Mikroskopie immer nur ein relativ kleiner Objektbereich (Gesichtsfeld), abhängig von der verwendeten Vergrößerung pro Aufnahme, erfasst werden kann, ist es aufgrund des notwendigen Stichprobenumfanges n zwingend erforderlich, mehrere Objektbereiche der Schleifwerkzeugoberfläche aufzunehmen. Die genaue Anzahl der Bereiche ist dabei abhängig von der Korngröße, der Kornkonzentration, des verwendeten Abbildungsmaßstabes (Vergrößerung) und des notwendigen Stichprobenumfanges. Bei den Untersuchungen mittels eines WLI wurde mit einer 5-fachen, 10-fachen und 20-fachen Vergrößerung gearbeitet. Bei einer Korngröße von D126 können bei einer mittleren Kornkonzentration 20 bis 30 Körner unter Nutzung einer 5-fachen Vergrößerung erfasst werden. Für eine statistisch gesicherte Angabe werden im Durchschnitt daher etwa 4 bis 5 Bereiche von der Werkzeugoberfläche benötigt. Unter Berücksichtigung der Vorgaben für die zulässige Messzeit und der erforderlichen Vergrößerung ist es notwendig, in einem Objektbereich mindestens zwischen 10 und 15 Schleifkörner zu erfassen. Hierbei zeigte sich, dass unter Anwendung der WLI aufgrund der vielfältigen Formausprägungen der einzelnen Schleifkörner, die sich ausbildenden Interferenzen mit der CCD-Matrix-Kamera nicht mehr in ausreichendem Maße aufgelöst werden konnten. Nur bei den Schleifwerkzeugen mit synthetischen Körnern und bei Anwendung von einer 20-fachen Vergrößerung (Abbildung von 3 bis 5 Körnen pro Objektbereich auf der CCD-Kamera) waren die Interferenzen in guter Qualität mit der Kamera zu erfassen und auswertbar. Die Abbildung 5 zeigt exemplarisch ein Ergebnis mit synthetischen Diamantkörnern bei 20-facher Vergrößerung. Obwohl die Höhenauflösung des WLI von 15 nm sehr gut ist, war es aufgrund der schwachen und für die CCD-Kamera nicht mehr auflösbaren Interferenzerscheinungen bei niedrigerer Vergrößerung nicht sinnvoll, dieses Verfahren in ein Prüfsystem für den Industrieeinsatz umzusetzen.

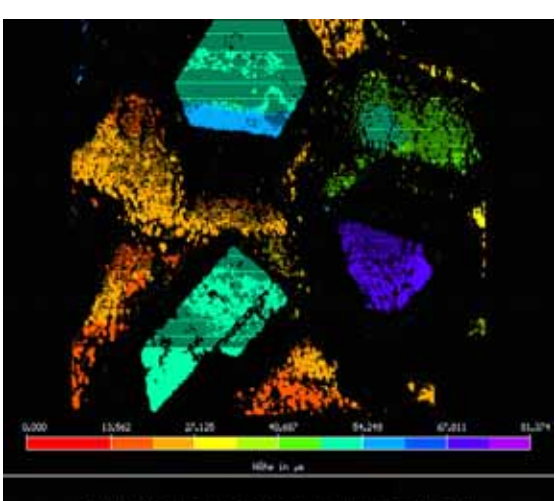


Abb. 5: Ausschnitt einer Schleifwerkzeugoberfläche mit synthetischen Diamanten am WLI (Quelle: GFE)

Die Untersuchungen mittels der konfokalen Mikroskopie zeigten, dass aufgrund der vorhandenen Strukturierung auf dem Untergrund (Abb. 6; Ebene der Galvanikbindung ist scharf abgebildet) als auch auf den Diamantkörnern (Abb. 7), die auftretenden Veränderungen des Kontrastes in Abhängigkeit der Z-Position (Abstand Objekt – Sensor) gute Voraussetzungen liefern, die Z-Position mit einer Genauigkeit im µm-Bereich zu ermitteln.

Ein relevanter Unterschied zwischen natürlichen und synthetischen Diamanten konnte nicht festgestellt werden. Eine Reduzierung der Vergrößerung, gleichbedeutend mit einer größeren Anzahl von Diamantkörnern in einem Bild, führte zu keiner wesentlichen Einschränkung der auswertbaren Kontrastveränderung in Abhängigkeit der Z-Position.

Auch bei dieser Vergrößerung lagen genügend Bildinformationen zur Verfügung, um die beiden Oberflächenkenngrößen mit der entsprechenden statistischen Sicherheit (Einhaltung des notwendigen Stichprobenumfanges) unter Beachtung der Messzeit und mit einer Höhenauflösung von 1µm ermitteln zu können.

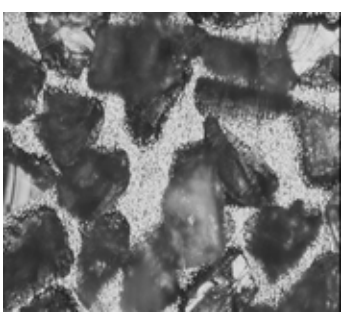


Abb. 6: Fokussierte Galvanikbindung (Quelle: GFE)

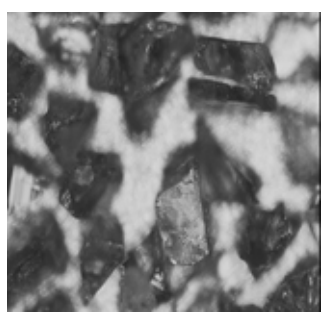


Abb. 7: Fokussierte Diamantkornoberfläche (Quelle: GFE)

4 Entwickeltes Messsystem und Software

Aufgrund der erzielten Untersuchungsergebnisse fiel die Entscheidung, ein konventionelles Auflichtmikroskop für den Einsatz der konfokalen Mikroskopie auszubauen. Das Mikroskop wurde mit einer 3-Chip-Farb-CCD-Matrixkamera zur Bildaufnahme ausgerüstet. Die Aufnahme der zu prüfenden Schleifwerkzeuge erfolgt auf einem Probentisch, der sowohl in X- und Y-Richtung als auch in zwei Drehachsen über Schrittmotoren bewegt werden kann. Die Abstandsänderung in Z-Richtung (Höhenverstellung) wird durch die motorisierte Bewegung des optischen Teils (Optik + Kamera) realisiert. Die Auflichtbeleuchtung des Objektes erfolgt mit zwei Lichtquellen, sowohl im Hellfeld als auch im Dunkelfeld. Die Einstellung der Intensität der Lichtquellen wird über den PC gesteuert. Als Objektive werden Long-Working-Distance-Objektive mit unterschiedlichen Vergrößerungen (in Abhängigkeit der Diamant- und CBN-Korngrößen) eingesetzt, um zwischen der Objektebene und der Optik einen ausreichenden Arbeitsabstand zu haben. Damit ist gewährleistet, dass auch bei einer hohen optischen Vergrößerung die Oberflächen von konvex und konkav gekrümmten Werkzeugen vermessen werden können. Die Ansteuerung der Bewegungsachsen in X-, Y- und Z- Richtung wird über eine entsprechende Interface-Karte in einem PC sichergestellt.

Um den zu erfassenden Objektausschnitt für die Kamera gegenüber einem herkömmlichen Mikroskop zu erhöhen, wurde in das Messsystem eine Rückvergrößerung von 0,5 eingebaut. Zur Bedienung des Oberflächenmessgerätes wurde in der GFE die Software „Surf-Control“ entwickelt, welche interaktiv zu bedienen ist. Es ist dazu in einer Teach-in-Routine der Messablauf vorzugeben, wodurch neben den jeweiligen Koordinaten auch produktspezifische Einstellungen separat abgespeichert werden, wie z. B. die eingesetzte Vergrößerung und die Korngröße. Somit kann das System anschließend automatisch und zeiteffektiv die Messungen durchführen. Weiterhin ist ein 3D-Viewer integriert, mit dem sich die Messdaten veranschaulichen lassen (Abb. 8).

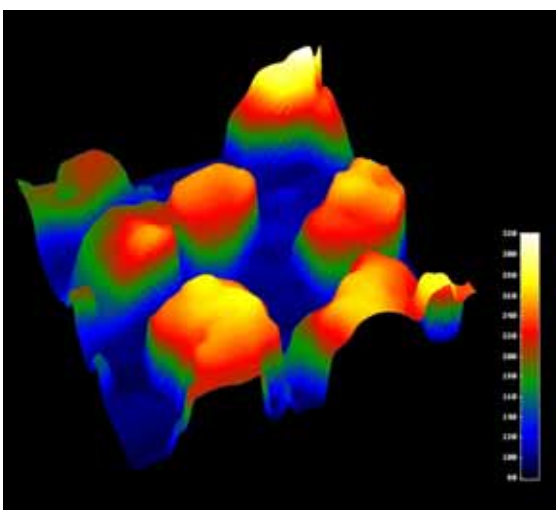


Abb. 8: Ergebnisdarstellung mit dem 3D-Viewer (Quelle: GFE)

5 Gerätesystem OMG3 und Anwendungen

Auf der Basis des vorgestellten Messsystems einschließlich der Software wurde durch die GFE ein modular aufgebautes Gerätesystem realisiert, das für den industriellen Einsatz bei Herstellern und Anwendern von Diamant- und CBN-Schleifwerkzeugen geeignet ist [5]. Die Grundkonfiguration des modularen Gerätesystems ist wie folgt charakterisiert:

Prüfmerkmale „Mittlerer Kornbindungsüberstand“ und „Kornspitzenverteilung“ bestimmbar an Schleifwerkzeugen, die in einem Bereich von D46 bis D501 belegt sind.

Messgenauigkeit: ± 2 µm (Objektbereich von 740 µm × 740 µm)

Charakterisierbare Krümmungsradien in Abhängigkeit der Korngröße:

D46 – D91: 1,4 mm

D126 – D301: 2,8 mm

D356 – D501: 5,6 mm

Mess- und Auswertezeit: ca. 30 s

6 Ausblick

Mit der Erarbeitung und Umsetzung des vorgestellten Messsystems und Verfahrens steht sowohl der Schleifwerkzeug- als auch der Anwenderindustrie eine Möglichkeit für die automatisch und objektiv ablaufende messtechnische Charakterisierung von Schleifwerkzeugoberflächen zur Verfügung. Die hohe Praxisrelevanz zeigt sich u. a. auch darin, dass Gerätesysteme dieser Art, speziellen Anwendererfordernissen angepasst, bei führenden Herstellern von Schleifwerkzeugen bereits erfolgreich im Einsatz sind.

Literatur

[1] Lucius, H., Lübeck, U. & W. Bahmann (2003): *Autofokus-Verfahren erfasst CBN-Schleifscheiben-Topographie.* Dima 11-12/08, S. 53-56

[2] Schöpf, M. & G. Burkhardt: *Beurteilung von Schleifbelägen. Qualität und Zuverlässigkeit.* 9/2001, S. 1200-1202

[3] Lahmann, H.-W., Begau, G. & M. Strnad: *Optoelektronische Verfahren zur Charakterisierung von Werkzeugen, Bauteilen und Hartstoffschichten*. 4. Schmalkalder Werkzeugtagung, Tagungsband, 8.und 9. 11.2000

[4] Bohlheim, W.: *Verfahren zur Ermittlung der Schleifscheibentopographie.* IDR 4/96, S. 218-222

[5] Lahmann, H.-W.: *Optisches System prüft Zerspanungswerkzeuge.* Qualität und Zuverlässigkeit, 1/2003, S. 55-57

Kalibrierung

Vergleich von Softwaretools zur Kamerakalibrierung

Jürgen PEIPE und Werner TECKLENBURG

Zusammenfassung

Mehrere kommerzielle photogrammetrische Softwarepakete, die eine Bestimmung der Kamerageometrie durch Simultankalibrierung erlauben, wurden getestet und verglichen. Geringe Abweichungen der Kalibrierparameter traten auf, v. a. bei den Verzeichnungsdaten.

1 Einleitung

Die photogrammetrische Rekonstruktion eines Objekts aus fotografischen Bildern setzt die Kenntnis der Kamerageometrie im Moment der Aufnahme voraus. Die benötigten Daten – dies sind i. Allg. die durch Kamerakonstante und Hauptpunktlage definierte Position des Projektionszentrums sowie Abbildungsfehler beschreibende Funktionen, z. B. zur Modellierung der Objektivverzeichnung – werden durch Kamerakalibrierung bestimmt.

Eine Kamera wird als „metrisch" bezeichnet, wenn die einmal ermittelten Werte der Kalibrierparameter über einen längeren Zeitraum unverändert bleiben. Dies ist bei den heutzutage erhältlichen Digitalkameras (Consumerkameras, aber auch Profikameras) in der Regel nicht der Fall. Änderungen der Parameter ergeben sich zum einen durch die normale Nutzung der Kameratechnik (Fokussierung, Zoom, Wechselobjektive etc.), zum anderen durch mechanische und temperaturabhängige Instabilitäten. Zu beachten ist allerdings auch das Verhältnis der Genauigkeit, mit der die Kameraparameter bekannt sind oder sein sollen, zur erforderlichen, nutzerdefinierten Genauigkeit der Objektrekonstruktion. Die relative Genauigkeit photogrammetrischer Auswertungen kann z. B. zwischen 1:100 und 1:200.000 liegen. Dies bedeutet auch unterschiedliche Ansprüche an die Kamerageometrie und ihre Stabilität. Wird eine relativ geringe Genauigkeit des erzeugten virtuellen 3D-Modells erwartet, so brauchen Änderungen der Kameraparameter unter Umständen gar nicht berücksichtigt zu werden, d. h. es kann mit einmal kalibrierten Werten gearbeitet werden (Vorabkalibrierung). Für die hochgenaue Objektrekonstruktion müssen dagegen aktuelle Daten vorhanden sein, bis hin zur Bestimmung der Kalibrierelemente für jedes einzelne Bild.

Üblich ist in jedem Fall die Ermittlung der Kameraparameter simultan mit der Objektauswertung, z. B. im Rahmen einer Bildtriangulation durch Bündelausgleichung (Simultankalibrierung, Selbstkalibrierung; siehe z. B. LUHMANN 2003). Die Qualität der Ergebnisse hängt von einer Reihe von Faktoren ab, v. a. auch von der gewählten Aufnahmeanordnung. Zur Lösung der Kalibrieraufgabe steht eine Reihe von kommerziellen Rechenprogrammen aus dem Bereich Nahbereichsphotogrammetrie und Computer-Vision zur Verfügung. In diesem Bericht werden einige davon untersucht und die berechneten Kameraparameter miteinander verglichen. Modelle werden beschrieben und Ergebnisse genannt; auf deren Übertragbarkeit von einer Software zur anderen wird hingewiesen. Darüber hinaus erfolgt keine Bewertung der Leistungsfähigkeit der untersuchten Programme, z. B. hinsichtlich der erreichten Genauigkeiten, Rechenzeiten, Anschaffungskosten etc.

2 Kamera, Objekt und Aufnahmeanordnung

Als Aufnahmeobjekt stand ein bei der Firma AICON 3D Systems installiertes räumliches Testfeld, bestehend aus kreisförmigen Zielmarken, zur Verfügung (Abb. 2). Dieses Objekt entspricht den Vorgaben der VDI/VDE-Richtlinie 2634/Blatt 1 für den Test optischer 3D-Messsysteme und wird regelmäßig zur Kalibrierung digitaler Kameras verwendet (VDI/VDE 2002, PEIPE & YU 2004). Die Aufnahmesituation ist wegen der räumlichen Tiefe des Objekts und einiger Verdeckungen als anspruchsvoll zu bezeichnen.

Digitale Bilder wurden mit einer Rollei d7metric[5] hergestellt. Diese Kamera (2552 × 1920 Pixel, 3,5 µm Pixelabstand, 7 mm Weitwinkelobjektiv; Abb. 1) weist einige Eigenschaften einer metrischen Kamera auf: hohe mechanische Stabilität durch rigide Verbindung von Objektiv und Sensor, Fixfokus, kein Zoom. Es ist davon auszugehen, dass die Kamera zumindest während einer Aufnahmeserie konstante Kalibrierparameter aufweist, sodass auf bildweise Kalibrierung verzichtet werden kann (PEIPE & STEPHANI 2003).

Der mit der d7metric[5] erzeugte Rundumverband umfasste 60 Bilder; enthalten waren auch gewälzte Aufnahmen auf mehreren Standpunkten. Die automatische Bildpunktmessung wurde mit der DPA-Pro Software durchgeführt (AICON 2006). Nach Grobfehlererkennung stand ein bereinigter Datensatz für alle Kalibrierberechnungen zur Verfügung.

Abb. 1: Rollei d7metric[5]

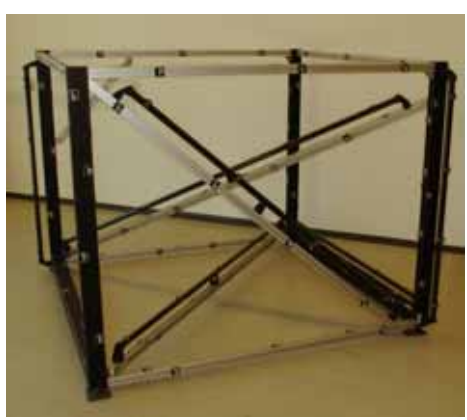


Abb. 2: Testkörper

3 Modellierung des Bildraums und Kalibriersoftware

Bei der Simultankalibrierung im Rahmen einer Bündelausgleichung werden üblicherweise die Kamerakonstante c, die Position x'_0, y'_0 des Bildhauptpunktes im Bildkoordinatensystem und Abbildungsfehler beschreibende Funktionen als Unbekannte bestimmt. In der vorliegenden Untersuchung werden die Abbildungsfehler durch Terme für die radialsymmetrische und für die radial-asymmetrische/tangentiale Verzeichnung erfasst. Dieser Parametersatz kann in allen getesteten Programmen gewählt werden.

Aus der Vielzahl von Programmen zur photogrammetrischen Objektrekonstruktion wurden vier kommerzielle Produkte ausgesucht:

- DPA-Pro (AICON 2006)
- CAP (K^2 2006)
- Australis (PHOTOMETRIX[1] 2006)
- PHIDIAS (PHOCAD 2006)

4 Berechnungen und Resultate

Zunächst wurden Bündelausgleichung und Simultankalibrierung mit dem Programm 1 durchgeführt. Die folgenden Angaben zeigen die gute Genauigkeit der Ergebnisse: Die Bildrestklaffungen betrugen $R_{x'} = 0{,}32$ µm und $R_{y'} = 0{,}31$ µm, die Standardabweichungen der ausgeglichenen Objektkoordinaten (RMS-Werte) $s_X = 0{,}050$ mm, $s_Y = 0{,}055$ mm und $s_Z = 0{,}050$ mm. Die ermittelten Kalibrierparameter und ihre Bestimmungsgenauigkeit (Standardabweichung) gehen aus Tabelle 1 hervor.

Tabelle 1: Ergebnisse der Simultankalibrierung (Programm 1)

c	7,4022 mm	0,0002 mm
x'_0	0,2816 mm	0,0004 mm
y'_0	–0,0373 mm	0,0003 mm
A_1	–22,32 d-4	2,60 d-6
A_2	4,23 d-5	1,07 d-7
B_1	–1,36 d-5	2,14 d-6
B_2	3,17 d-5	1,80 d-6

Vergleicht man nun die Ergebnisse aller vier Programme, so zeigt Tabelle 2 sehr ähnliche Daten für die Lage des Projektionszentrums c, x'_0, y'_0. Die einzige Abweichung bei der Kamerakonstante erklärt sich daraus, dass Programm 3 eine andere Parametrisierung der radial-symmetrischen Verzeichnung verwendet. Diese Parameter sind aber bekanntlich mit der Kamerakonstanten korreliert. Durch Einführung eines zweiten Nulldurchgangs der Verzeichnungskurve an einer gewählten Stelle r'_0 (hier $r'_0 = 3{,}3495$ mm) kann diese „balanciert“ werden, d. h. die maximalen und minimalen Werte der Verzeichnungskurve werden etwa gleich groß, über den gesamten Bildbereich hinweg. Nach dieser Umrechnung ergibt sich die Kamerakonstante ebenfalls zu c = 7,4022 mm. Die Standardabweichungen dieser drei Unbekannten liegen in allen Programmen gleich bei $s_c = 0{,}0002$ mm, $s_{x'0} = 0{,}0004$ mm und $s_{y'0} = 0{,}0003$ mm.

[1] Die Firma Photometrix vertreibt auch die iWitness Software (FRASER & HANLEY 2004), die von Australis abgeleitet ist und daher gleiche Kalibrierergebnisse liefert.)

Tabelle 2: Vergleich für die Parameter c, x'_0 und y'_0 (alle vier Programme)

Software	c	x'_0	y'_0
1	7,4022	0,2816	–0,0373
2	7,4022	0,2808	–0,0372
3	7,4022	0,2807	–0,0372
4	7,4022	0,2818	–0,0372

Die radial-symmetrische Verzeichnung wird – wie zuvor angeführt – im Programm 3 durch den Ansatz

$$dr'_{rad} = K_1 * r'^3 + K_2 * r'^5 + \ldots\ldots \quad (1)$$

modelliert, die anderen Programme verwenden die balancierte Form

$$dr'_{rad} = A_1 * r'(r'^2 - r'^2_0) + A_2 * r'(r'^4 - r'^4_0) + \ldots\ldots \quad (2)$$

In der vergleichenden Tabelle 3 sind für Programm 3 die bereits in die balancierte Form umgerechneten Werte für A_1 und A_2 angegeben.

Tabelle 3: Vergleich der Parameter für die radial-symmetrische Verzeichnung

Software	A_1	A_2	dr'_{rad} (r' = 5 mm)
1	–22,32 d-4	4,23 d-5	–48,3 µm
2	–22,30 d-4	4,23 d-5	–48,1 µm
3	22,22 d-4	–4,13 d-5	50,0 µm
4	–22,36 d-4	4,23 d-5	–48,5 µm

Als Ergebnis der Simultankalibrierungen erhält man geringe Unterschiede der Verzeichnungsparameter (aber: Vorzeichen beachten!). In der vierten Spalte von Tabelle 3 sind Verzeichnungswerte dr'_{rad} für einen Bildpunkt mit dem Abstand $r' = 5$ mm von der Bildmitte angegeben.

Bei der radial-asymmetrischen/tangentialen Verzeichnung (auch: Dezentrierverzeichnung) zeigen sich ähnliche, relativ geringe Effekte (Tab. 4). Alle Programme verwenden den folgenden Ansatz

$$dx'_{tan} = B_1 * (r'^2 + 2x'^2) + 2B_2\, x'y' \quad (3)$$

$$dy'_{tan} = B_2 * (r'^2 + 2y'^2) + 2B_1\, x'y' \quad (4)$$

Tabelle 4: Parameter für die radial-asymmetrische/tangentiale Verzeichnung

Software	B_1	B_2	dx'_{tan} dy'_{tan} (bei r′ = 5 mm)
1	–1,36 d-5	3,17 d-5	0,0 µm 1,0 µm
2	–1,72 d-5	3,19 d-5	-0,2 µm 1,0 µm
3	1,97 d-5	–3,48 d-5	0,3 µm –1,0 µm
4	–1,28 d-5	3,26 d-5	0,0 µm 1,1 µm

Die diskreten Werte an der Stelle r′ = 5 mm zeigen geringe Unterschiede zwischen den vier Programmen (Tab. 4; bei Programm 3: Vorzeichenwechsel beachten!). In Abbildung 3 sind die Auswirkungen der radial-asymmetrischen/tangentialen Verzeichnung am Beispiel der Ergebnisse von Programm 1 dargestellt, bezogen auf das Bildformat der eingesetzten Kamera.

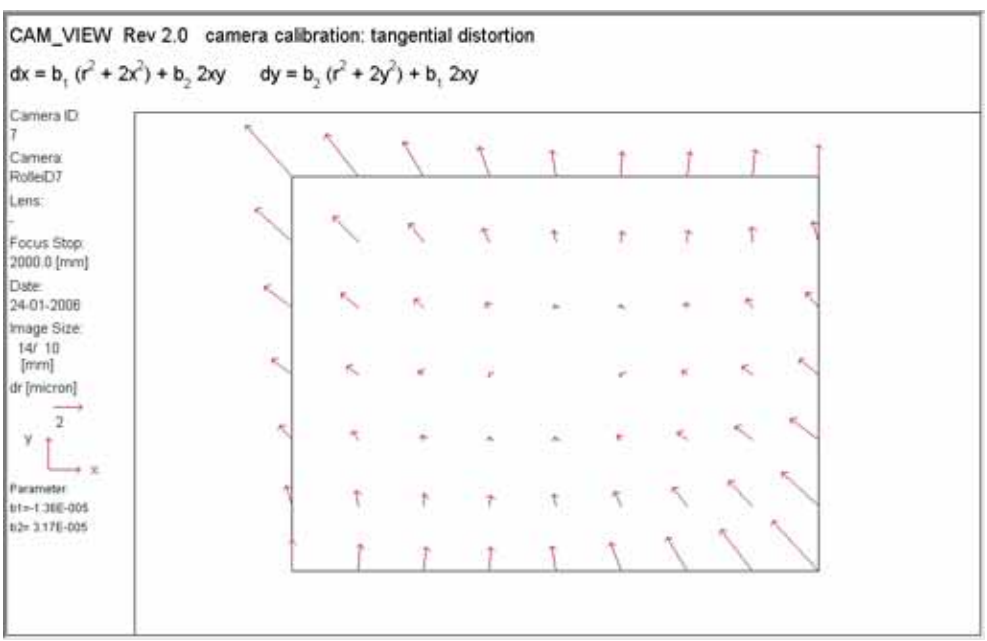


Abb. 3: Einfluss der radial-asymmetrischen/tangentialen Verzeichnung

5 Fazit und Ausblick

Ziel der Untersuchung war ein Vergleich der mit unterschiedlicher Software durch Simultankalibrierung ermittelten Kameraparameter eines Bilddatensatzes. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassend sagen:

- Mit vier kommerziellen Photogrammetrie-Programmen wurden gut übereinstimmende Kalibrierparameter ermittelt. Geringe Abweichungen traten bei den Verzeichnungsdaten auf.
- Bei unterschiedlicher Parametrisierung der radial-symmetrischen Verzeichnung ist eine Umrechnung relativ leicht möglich (unterschiedliche Vorzeichen der Modellierungsparameter beachten!).
- Während der bisher verwendete Bilddatensatz aus einem praktischen Projekt (Systemtest nach VDI/VDE 2634) stammt, werden bei weiteren Untersuchungen simulierte Daten miteinbezogen (HASTEDT et al. 2005).
- Weitere Software soll getestet werden, z. B. PhotoModeler, ShapeCapture und Computer Vision Ansätze, z. B. in Matlab.

Literatur

AICON (2006): *DPA-Pro Produktinformation*. www.aicon.de

Fraser, C. S. & H. B. Hanley (2004): *Developments in Close-Range Photogrammetry for 3D Modelling: The iWitness Example*. Int. Archives Photogrammetry, Rem. Sensing & Spatial Information Sciences (CD-Rom), Vol. XXXVI-5/W1

Hastedt, H., Luhmann, T. & W. Tecklenburg (2005): *Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634*. In: Publ. DGPF, Bd. 14. Seyfert, E. (Hrsg.), Potsdam. 319-326

K^2 (2006): *CAP Produktinformation*. www.k2-photogrammetry.de

Luhmann, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 586 S

Peipe, J. & M. Stephani (2003): *Untersuchungen zur Stabilität und metrischen Qualität einer digitalen 5 Megapixel Messkamera*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 51-56

Peipe, J. & Q. Yu (2004): *Wie viele Pixel braucht der Mensch? Kameras und ihre Anwendung*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 116-123

PHOCAD (2006): *PHIDIAS Produktinformation*. www.phocad.de

Photometrix (2006): *Australis Produktinformation*. www.photometrix.com.au

VDI/VDE (2002): *VDI/VDE-Richtlinie 2634*. Beuth Verlag, Berlin

Zur Nutzung von RGB-Farbkanälen für die hochgenaue3D-Punktbestimmung

Heidi HASTEDT, Thomas LUHMANN und Werner TECKLENBURG

Zusammenfassung

Der Beitrag befasst sich mit der Möglichkeit, alle drei in einem Farbbild gespeicherten Kanäle für die hochgenaue photogrammetrische 3D-Punktmessung zu verwenden. Nach einer Übersicht über die wesentlichen auf dem Markt befindlichen Typen von digitalen Farbbildsensoren werden die wellenlängenabhängigen Abbildungsfehler gängiger Objektivtypen erläutert. Daraus können verschiedene Möglichkeiten zur Korrektur der auftretenden Effekte abgeleitet werden, deren Wirkung auf die Ergebnisse einer Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung untersucht werden. Für die üblicherweise in der Nahbereichsphotogrammetrie verwendeten Aufnahmekonfigurationen ist ein signifikanter Genauigkeitsgewinn zu verzeichnen von ca. Faktor 1,7, der sich bei verschiedensten Kamera- und Objektivkombinationen nachweisen lässt.

1 Einleitung

Mit der Einführung der ersten höher auflösenden Digitalkameras (Still-Video-Kameras) in den 1990er-Jahren standen zunächst nur Schwarz-Weiß-Kameras zur Verfügung, deren Genauigkeitspotenzial schon früh nachgewiesen worden ist (z. B. PEIPE 1995, SHORTIS & BEYER 1996). Trotz der damals noch zahlreichen technischen Einschränkungen dieser Kameras konnte die volle physikalische Sensorauflösung für die Bildauswertung genutzt werden. Mit der zunehmenden Verbreitung von Digitalkameras im Consumerbereich stieg zum einen die verfügbare Bildauflösung ständig an und hat heute bei professionellen Spiegelreflexkameras und digitalen Kamerarückteilen mehr als 20 Megapixel erreicht. Sensoren mit über 40 Megapixel sind bereits angekündigt worden. Zum anderen werden SW-Kameras praktisch gar nicht mehr angeboten, auch wenn sie für messtechnische Zwecke vorteilhaft wären. Im Bereich von digitalen Videokameras mit bis zu 1300 × 1000 Pixel sind dagegen SW-Sensoren ohne weiteres erhältlich.

Für die industrielle photogrammetrische 3D-Messtechnik werden hochauflösende Spiegelreflexkameras in der Regel für Offline-Anwendungen eingesetzt. Die meisten Auswerteprogramme sind dabei nicht in der Lage, echte Farbbilder auszuwerten, sondern beschränken sich auf einen Kanal (in der Regel grün) oder erwarten in Grauwertbilder umgewandelte Eingabebilder. In Abhängigkeit des eingesetzten Farbsensors und der kamerainternen oder nachträglichen Verarbeitung der Bilder ist in der Regel ein Verlust des geometrischen Auflösungsvermögens und damit einhergehend eine reduzierte Bildmess- und Objektpunktgenauigkeit zu erwarten.

Weiterhin führen wellenlängenabhängige Abbildungsfehler der optischen Komponenten sowie mögliche unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten in einzelnen Farbkanälen dazu, dass ein Farbbild verschiedenen geometrischen Fehlern unterworfen ist. Hier ist in

erster Linie die chromatische Aberration zu erwähnen, die mit dem Farblängsfehler zu wellenlängenabhängigen Brennweiten und Fokusebenen und mit dem Farbquerfehler zu einer Maßstabsänderung in Abhängigkeit des Bildradius (Abstand eine Punktes von der optischen Achse) führt. Ebenso ist die radial-symmetrische Verzeichnung von der Wellenlänge abhängig, da sie im Wesentlichen durch Brechungsänderungen im Objektiv und durch Öffnungsdurchmesser und Position der Blende bestimmt wird.

Dieser Beitrag befasst sich daher mit Möglichkeiten zur Optimierung der photogrammetrischen Objektpunktmessung unter Ausnutzung der im Farbbild enthaltenen Farbinformation. Ziel ist es langfristig, mit einer Farbdigitalkamera das gleiche Genauigkeitsniveau zu erreichen, das mit einem SW-Bildsensor erreichbar wäre.

2 Farbkameras und Bildsensoren

Ein digitales Farbbild besteht bekanntermaßen aus drei Kanälen in den Grundfarben Rot, Grün, Blau (RGB). Gängige Kameras liefern dabei entweder Bilder im Rohformat, d. h. unkomprimierte Bilddaten in voller geometrischer und radiometrischer Auflösung, oder in einem standardisierten Bildformat (TIFF, JPEG), das verlustfreie oder verlustbehaftete Kompressionsverfahren durchlaufen hat.

Farbdigitalkameras arbeiten in der Regel nach einem der beiden folgenden Prinzipien (Übersicht in LUHMANN 2003):

a) Trennung der RGB-Information durch Farbfiltermasken, die unmittelbar vor der lichtempfindlichen Sensorfläche angebracht sind
b) Trennung der RGB-Information in einem Echtfarbsensor, der analog zum analogen Farbfilm drei Halbleiterschichten für je eine Grundfarbe besitzt

Bei der unter a) genannten Möglichkeit werden Filtermasken eingesetzt, die benachbarte Pixel nur für jeweils einen Wellenlängenbereich sensibilisieren. Die bekannteste Filtermaske ist das sog. Bayer-Muster, das in einer 2 × 2-Pixelumgebung ein Pixel für rot, ein Pixel für blau und zwei Pixel für grün aktiviert (siehe Abb. 1). Die verstärkte Betonung für grün ist dadurch begründet, dass das menschliche Auge für gelbgrüne Farben am empfindlichsten reagiert. In jüngerer Zeit werden auch Kameras angeboten, deren Farbfiltermasken für die Grundfarben rot, grün, blau und cyan (Emerald) ausgelegt sind. Neben der regelmäßigen Anordnung von Farbpixeln in Zeilen und Spalten existieren bei den Kameras der Firma Fuji auch Sensoren mit unterschiedlich großen oder diagonal angeordneten Sensorelementen.

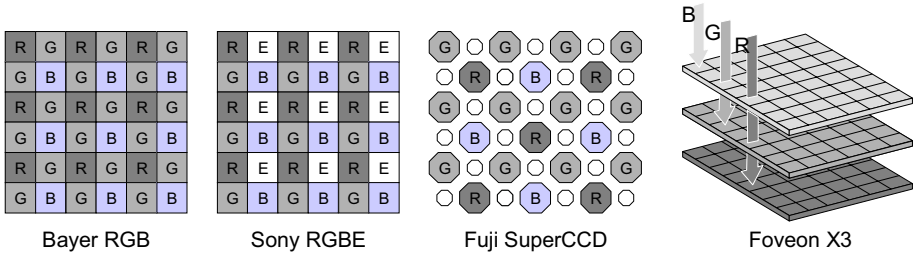


Abb. 1: Layout verschiedener Farbsensoren

Eine ganz andere Technologie wird mit den Foveon-Sensoren angeboten, die über drei übereinander liegenden Farbschichten ausgestattet sind. Hierbei erhält jedes Pixel an einer Stelle x,y per se einen eigenen RGB-Wert, sodass das geometrische Auflösungsvermögen dieser Sensoren etwa um den Faktor 2 besser ist als das herkömmlicher Farbsensoren (LYON & HUBEL 2002). Diese Sensoren sind jedoch heute nur bis zu einer Anzahl von 2268 × 1512 Pixel erhältlich.

3 Optische Abbildungsfehler

3.1 Verzeichnung

Verzeichnung entsteht in praktisch jedem Objektiv durch Brechungsänderungen (Dispersion) an asymmetrisch aufgebauten Linsensystemen sowie durch Einbau einer Blende. Je nach Position der Blende entsteht tonnen- oder kissenförmige radial-symmetrische Verzeichnung; eine zentral angebrachte Blende in einem symmetrisch aufgebauten Objektiv führt zu einer praktisch verzeichnungsfreien (orthoskopischen) Abbildung (siehe Abb. 2). Da Brechungsänderungen wellenlängenabhängig sind, ist somit auch die Verzeichnung eine Funktion der Wellenlänge (Übersicht in LUHMANN 2003).

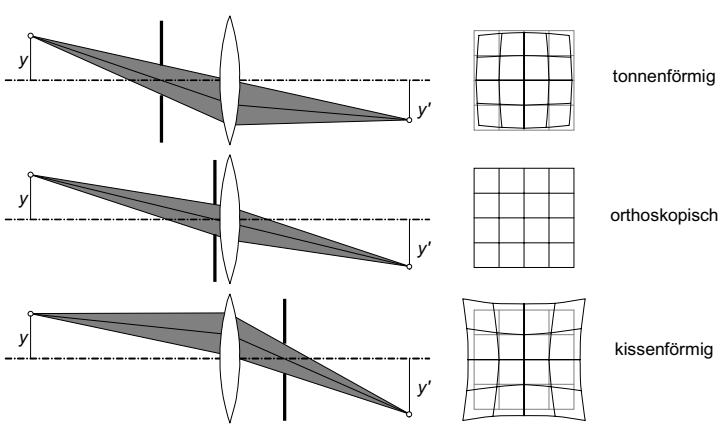


Abb. 2: Radial-symmetrische Verzeichnung in Abhängigkeit der Blendenposition

Neben der radial-symmetrischen Verzeichnung wird der Einfluss nicht zentrierter Linsen durch tangentiale und asymmetrische Korrekturfunktionen erfasst. Abbildungsfehler in der Sensorebene oder durch elektronische Effekte werden hier nicht weiter behandelt.

Die photogrammetrischen Korrekturpolynome für die radial-symmetrische Verzeichnung werden üblicherweise im Rahmen einer Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt. Da hierbei in der Regel auch die Kamerakonstante bestimmt wird, sind die Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung (A_1, A_2, A_3 bzw. K_1, K_2, K_3) linear von der Kamerakonstante abhängig und können nur dann durch Selbstkalibrierung bestimmt werden, wenn entweder ein zweiter Nulldurchgang der Verzeichnungsfunktion r_0 eingeführt wird oder auf den linearen Term des Korrekturpolynoms verzichtet wird.

In jeder Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung existieren numerische Korrelationen zwischen den Parametern der inneren und äußeren Orientierung, deren Größenordnung unter anderem von der gewählten Aufnahmekonfiguration und der verfügbaren Objektinformation abhängt. Sie führen dazu, dass z. B. die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem (c,x'_0,y'_0) teilweise durch entsprechende Verschiebung der äußeren Orientierungsparameter X_0,Y_0,Z_0 beschrieben werden kann. Mit dem Verfahren der Plumbline-Kalibrierung (FRYER & BROWN 1986) ist eine Bestimmung der radial-symmetrischen Verzeichnung ohne Abhängigkeit von der äußeren Orientierung möglich, sie ist aber in der Praxis häufig nicht einsetzbar.

3.2 Chromatische Aberration

Die chromatische Aberration entsteht durch den in den einzelnen Wellenlängen unterschiedlichen Strahlengang durch ein Objektiv. Der *Farblängsfehler* (longitudinale chromatische Aberration) führt dazu, dass jede Wellenlänge einen eigenen Brennpunkt besitzt. Ein abgebildeter weißer Objektpunkt wird im Bild in unterschiedlichen Bildweiten abgebildet, sodass keine optimale Fokussierung möglich ist (siehe Abb. 3). Je nach Qualität eines Objektives kann dieser Effekt durch unterschiedliche Linsentypen und Beschichtungen reduziert werden. Wird die Abbildungsebene auf eine mittlere Wellenlänge (z. B. grün) gelegt, so entstehen im blauen und im roten Bereich Abbildungsfehler, die im Mittel auf ein Minimum reduziert werden (Übersichten in PEDROTTI et al. 2002, SCHRÖDER 1990).

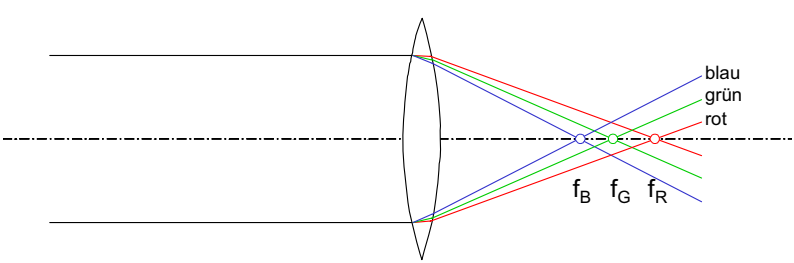


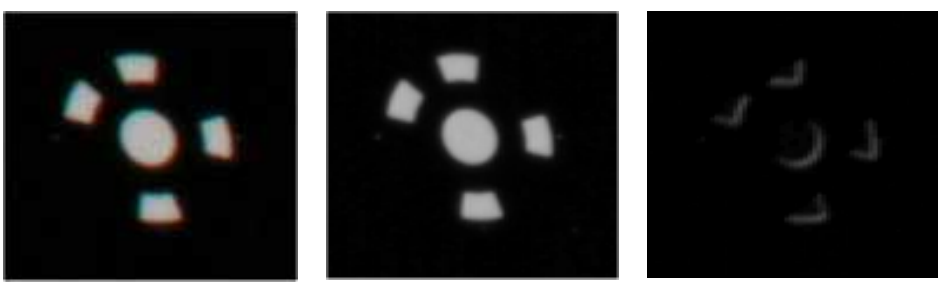
Abb. 3: Farblängsfehler

In der Praxis führt chromatische Abberation zu einer schlechteren Schärfeleistung. So genannte Achromate sind Objektive, deren Aufbau so gestaltet ist, dass die chromatische Abberation unter eine sichtbare Größenordnung fällt. Werden die in der Nahbereichspho-

togrammetrie üblichen weißen Zielmarken verwendet, führt der Farblängsfehler theoretisch nicht zu einer Verschiebung des Zielmarkenzentrums, da weißes Licht alle Wellenlängen enthält. Wird jedoch mit farbigen, z. B. roten und grünen Zielmarken gearbeitet (siehe z. B. CRONK et al. 2006), werden diese Punkte im Farbbild unterschiedlich stark versetzt abgebildet.

Der *Farbquerfehler* (Farbvergrößerungsfehler oder transversale chromatische Aberration) führt dazu, dass ein Objekt mit unterschiedlichem Abbildungsmaßstab in Abhängigkeit vom Bildradius abgebildet wird. Für monochromatisches Licht entspricht der Effekt der radial-symmetrischen Verzeichnung, für polychromatisches Licht führt der Farbquerfehler zu einer radial-wirkenden Farbverschiebung.

Der Effekt kann in digitalen Farbbildern leicht gezeigt werden. Abb. 4a zeigt die mangelnde Abbildungsqualität weißer Zielmarken in einem Farbbild. Deutlich sind Farbfehler an den Kanten der Marken erkennbar, wie sie auch bei jeder anderen Objektkante entsprechend auftreten werden. Abb. 4b zeigt den grünen Kanal mit einer hinreichenden Bildqualität, wie sie für eine photogrammetrische Punktmessung in der Regel ausreicht. Das Differenzenbild in Abb. 4c macht die Farbverschiebung zwischen grünem und rotem Kanal deutlich.



a) RBG-Originalbild b) grüner Kanal c) Differenzenbild Rot – Grün

Abb. 4: Farbverschiebung an einer schwarz-weißen Kante (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

Die dargestellte Farbverschiebung wirkt sich in farbkanalabhängigen Funktionen der radialsymmetrischen Verzeichnung aus. Der Effekt wird beispielhaft in Abb. 5 visualisiert. Bei Kenntnis der jeweiligen Farbverschiebung kann das Bild verzeichnungsfrei bzw. aberrationsfrei gerechnet werden. Dazu stehen kommerzielle Näherungslösungen zur Verfügung (z. B. NIKON Capture 4.4 oder Adobe Photoshop CS2). Eine photogrammetrisch fundierte Lösung präsentieren SCHWALBE & MAAS (2006) sowie KAUFMANN & LADSTÄDTER (2005).

4 Untersuchungen

Ziel der folgenden Arbeiten ist zunächst die Untersuchung des Einflusses der chromatischen Aberration auf die Bild- und Objektpunktmessgenauigkeit im Rahmen typischer Testfeldkalibrierungen. Die Versuche werden mit verschiedenen hochauflösenden Digital-

spiegelreflexkameras und verschiedenen Objektiven durchgeführt. Daraus wird schließlich ein Vorschlag abgeleitet, nach dem die Nutzung von Farbbildauszügen zu einer signifikanten Genauigkeitssteigerung führt.

Die vorgestellten Untersuchungen haben nicht das Ziel, die oft mangelnde Bildqualität von Farbkameras durch optimierte Neuberechnung eines RGB-Bildes zu beheben. Einen Ansatz dazu beschreiben SCHWALBE & MAAS (2006) sowie KAUFMANN & LADSTÄDTER (2005).

4.1 Versuchsbedingungen

Für die in Tabelle 1 aufgeführten Digitalkameras und Objektive wurden für die Erfassung von Bildverbänden durchschnittlich 18 Bilder eines Testfeldes (1,0 × 1,0 × 0,5 m) mit ca. 100 Zielpunkten und i. d. R. einem Maßstab aufgenommen.

Tabelle 1: Übersicht Untersuchungsdaten

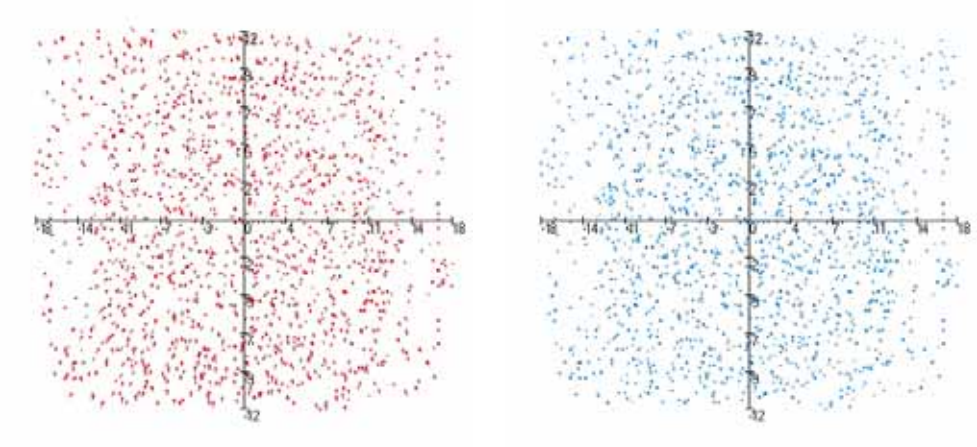
Kameras	**Pixelauflösung**	**Sensorformat [mm]**	**Objektive [mm]**
Fuji S2 Pro	3040 × 2016	23,3 × 15,6	14, 20, 28
Canon EOS D1 MarkII	4992 × 3328	36,0 × 24,0	35
Nikon D2X	4288 × 2848	23,5 × 15,6	24
Sigma SD10	2268 × 1512	20,7 × 13,8	24

4.2 Auswertung

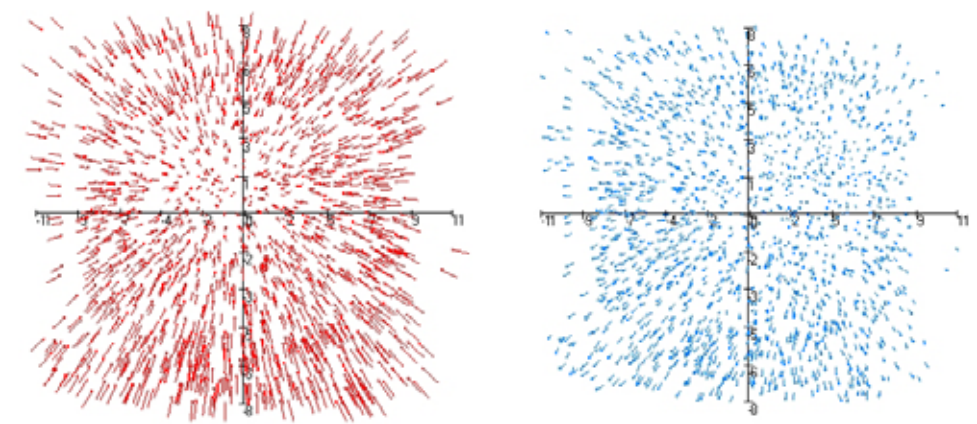
Für die Optimierung der photogrammetrischen Auswertung durch Nutzung aller Farbinformationen in den Aufnahmen werden zunächst Einzelbilder durch Trennung der Farbkanäle erzeugt. In den einzelnen Kanälen sowie in den Farb- und Graustufenbildern erfolgt eine Bildpunktmessung mit anschließender Bündelausgleichung mit dem Programm 3D Studio (AICON). Diesem Schritt schließt sich eine kombinierte Auswertung der in den einzelnen Kanälen erzeugten Bildmessungen mit dem Programm Ax.Ori (AXIOS 3D) an. Die äußeren Orientierungen der drei Kanäle werden hier für jeden Aufnahmestandort festgehalten, d. h. sie werden pro Standort nur einmal bestimmt. Zusätzlich werden drei Kameras jeweils für R, G und B eingeführt. Die Kameraparameter c, x'_0, y'_0 sowie A_1, A_2, A_3 sind variabel definiert. Die tangential-asymmetrische Verzeichnung (B_1, B_2) sowie Affinität und Scherung (C_1, C_2) sind fixiert. Die Datumsfestlegung erfolgt durch freie Netzausgleichung über alle Objektpunkte und ggf. über Maßstabsinformationen.

4.3 Ergebnisse

Die unterschiedlichen Bildmessungen in den drei Farbkanälen werden zunächst als Vektordiagramme dargestellt. Abb. 5 zeigt beispielhaft für zwei Datensätze die Ergebnisse der Bildmessungen im grünen Farbkanal als Verschiebungsvektoren zu korrespondieren Messungen im roten bzw. blauen Kanal.



Canon EOS D1 mit 35 mm Objektiv



Fuji S2 Pro mit 20 mm Objektiv

Abb. 5: Vektordarstellung der Bildmessungen in R und B gegenüber G-Kanal (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

Für die Canon EOS D1 zeigen sich hier beispielsweise im Vergleich zur Fuji S2 Pro mit einem 20 mm Objektiv kaum Abweichungen der Farbkanäle untereinander. Dies bestätigt die Betrachtung der Kamerakonstanten nach der kombinierten Auswertung. Vermutlich handelt es sich bei dem Objektiv um ein optimiert farbkorrigiertes Objektiv.

Die Ergebnisse der kombinierten Auswertung bestätigen die in Abb. 3 angegebenen theoretischen Abhängigkeiten der Kamerakonstante vom Farblängsfehler. Bei allen Datensätzen (Tabelle 1), außer der Canon, ergeben sich kürzere c_B als c_R.

Tabelle 2: Kameraparameter bei kombinierter Auswertung

Kamerakonstante	c_R	c_G	c_B
Canon EOS D1 mit 35 mm	–33,3337	–33,3299	–33,3309
Fuji S2 Pro mit 20 mm	–20,5739	–20,5557	–20,5468
Bildhauptpunkt x'$_0$	**x'$_{0R}$**	**x'$_{0G}$**	**x'$_{0B}$**
Canon EOS D1 mit 35 mm	–0,0345	–0,0342	–0,0341
Fuji S2 Pro mit 20 mm	0,2812	0,2818	0,2812
Bildhauptpunkt y'$_0$	**y'$_{0R}$**	**y'$_{0G}$**	**y'$_{0B}$**
Canon EOS D1 mit 35 mm	–0,0494	–0,0493	–0,0490
Fuji S2 Pro mit 20 mm	–0,2080	–0,2095	–0,2105

Der wesentliche Erfolg der vorgestellten kombinierten Auswertung liegt in der Verbesserung der inneren Systemgenauigkeit im Vergleich zur herkömmlichen Auswertung mit Graustufenbildern um durchschnittlich Faktor 1,7 (Durchschnitt über 6 vollständig unabhängige Datensätze u.a. unterschiedlicher Konfiguration). Die kleinste Verbesserung liegt hier bei Faktor 1,6 für die Fuji S2, die größte bei Faktor 1,8 für die Canon.

Erstaunlicherweise zeigt sich hier, dass auch für die bereits hochgenauen Ergebnisse mit der Nikon D2X eine entsprechende Genauigkeitssteigerung von 1:158.000 auf 1:280.000 erzielt werden kann.

Tabelle 3: Übersicht Systemgenauigkeit

	[mm]	**RMS$_X$**	**RMS$_Y$**	**RMS$_Z$**	**RMS$_{XYZ}$**	**Relative Genauigkeit**
Fuji S2 Pro 20 mm	Graustufen	0,0117	0,0118	0,0179	0,0244	1:62.000
	Kombiniert	0,0071	0,0072	0,0110	0,0149	1:100.000
Fuji S2 Pro 14 mm	Graustufen	0,0186	0,0185	0,0324	0,0417	1:36.000
	Kombiniert	0,0099	0,0097	0,0191	0,0237	1:64.000
Canon D1 35 mm	Graustufen	0,0136	0,0136	0,0183	0,0265	1:57.000
	Kombiniert	0,0069	0,0072	0,0104	0,0144	1:105.000
Nikon D2X 24 mm	Graustufen	0,0046	0,0049	0,0067	0,0095	1:158.000
	Kombiniert	0,0025	0,0024	0,0040	0,0053	1:285.000
Sigma SD10 24 mm	Graustufen	0,0155	0,0153	0,0193	0,0291	1:50.000
	Kombiniert	0,0092	0,0096	0,0123	0,0181	1:83.000

Die Ergebnisse bestätigen den nach FRASER (1996) bekannten Zusammenhang zwischen Objektgenauigkeit s_{XYZ}, Bildmessgenauigkeit $s_{x'y'}$, Bildmaßstab m_b, Design-Faktor q_D und Anzahl der Bilder pro Standpunkt k.

$$s_{XYZ} = q \cdot m_b \cdot s_{x'y'} = \frac{q_D}{\sqrt{k}} m_b \cdot s_{x'y'}$$

Für $k = 1$ gilt $q = q_D$. Für die getrennt eingeführten RGB-Kanäle gilt $k = 3$, sodass mit $\sqrt{3} = 1.73$ der empirisch ermittelte Genauigkeitsgewinn von ca. 1,8 bestätigt wird. Für die berechneten Beispiele ergibt sich damit ein durchschnittlicher Design-Faktor von 0,7.

Die in Kapitel 3.2 vorgestellte Vorkorrektur der Farbbilder mit PhotoShop CS2 wurde mit Daten der Nikon D2X und der Sigma SD10 durchgeführt. Es ergab sich keine Verbesserung gegenüber der Auswertung mit den korrespondierenden Graustufenbildern. Dieses aufwändige Verfahren erzielt damit keine Vorteile für die messtechnische Auswertung und kann daher verworfen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Grundlage dieser Untersuchung war die Annahme, dass die typische Genauigkeit von professionellen Farbdigitalkameras von ca. 1:100.000 (innere Genauigkeit bei signalisierten Bildverbänden, siehe z. B. PEIPE 2005) das vorhandene Potenzial noch nicht ausschöpft. Bildvariante Kalibrierungen sind in der Lage, während einer Aufnahmeserie auftretende Änderungen der Kamerageometrie zu erfassen (HASTEDT et al. 2004). Die genauere Modellierung der Farbeigenschaften von Kamera und Objektiv lag daher nahe, um die Auswirkungen durch Farbfehler im Objektiv, Farbmasken auf dem Sensor oder kamerainterne Prozessierung genauer zu verstehen.

Die objektivabhängige chromatische Aberration erzeugt signifikant unterschiedliche Bilder in den einzelnen RGB-Kanälen. Der Effekt muss aber nicht als negativer Einfluss interpretiert werden, sondern zeigt, dass alle Farbkanäle zusammen über mehr Informationsgehalt verfügen als ein einziger Kanal. Führt man daher in allen einzelnen Kanälen unabhängige Bildmessungen durch und kombiniert man diese Beobachtungen durch geeignete Zusatzbedingungen im Objektraum, ist eine signifikante Genauigkeitssteigerung von ca. Faktor 1,7 erzielbar. Vereinfacht ausgedrückt werden pro Aufnahmestandort drei Bilder eingeführt, die theoretisch und praktisch zu einer Steigerung der inneren Genauigkeit führen (FRASER 1996, FRASER et al. 2005).

Der vorgestellte Ansatz ist anwenderfreundlich, da keine weiteren Softwaremodule (z. B. Resampling für Aberrationskorrektur) integriert werden müssen. Die Verarbeitungszeiten verlängern sich um den Betrag, der für Bildmessungen in zwei zusätzlichen Kanälen erforderlich ist. Dies sind in der Praxis nur wenige Sekunden für einen gesamten Bildverband.

Die zukünftigen Arbeiten werden sich auf die Untersuchung der äußeren Genauigkeit (Längenmessabweichung nach VDI 2634) konzentrieren. Es muss weiterhin untersucht werden, warum die verschiedenen Kamera/Objektiv-Kombinationen zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Literatur

Cronk, S., Fraser, C. S. & H. Hanley (2006): *Automatic calibration of colour digital cameras*. The Photogrammetric Record, erscheint 2006

Fraser, C. S. (1996): *Network design*. In: Atkinson K. B. (Ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing. 256-281

Fraser, C. S., Woods, A. & D. Brizzi (2005): *Hyper redundancy for accuracy enhancement in automated close-range photogrammetry*. The Photogrammetric Record, Volume 20 , September

Fryer, J. G. & D. C. Brown (1986): *Lens Distortion for Close-Range Photogrammetry*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (52), No. 1. 51-58

Fryer, J. G. (1996): *Camera calibration*. In: Atkinson K. B. (Ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing, Caithness, UK. 156-179

Hastedt, H., Luhmann, T. & W. Tecklenburg (2004): *Modellierung hochauflösender digitaler Kameras im Hinblick auf ihre Verifizierung nach VDI/VDE 2634.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 72-79

Kaufmann, V. & R. Ladstädter (2005): *Elimination of color Fringes in digital photographs caused by lateral chromatic aberration.* XXth International CIPA Symposium

Luhmann, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Lyon, R. & P. Hubel (2002): *Eyeing the Camera: Into the Next Century*. IS&T/TSID 10th Color Imaging Conference Proceedings, Scottsdale, Az., USA. 349-355

Peipe, J. (1995): *Photogrammetric investigation of a 3000 x 2000 pixel high-resolution still-video camera*. ISPRS Intercommission Workshop „From Pixels to Sequences“, Zürich

Peipe, J. (2005): *Entwicklungstendenzen in der digitalen Fotografie*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 150-155

Pedrotti, F., Pedrotti, L., Bausch, W. & H. Schmidt (2002): *Optik für Ingenieure – Grundlagen*. Springer Verlag, Berlin, 846 S.

Schröder, G. (1990): *Technische Optik*. Kamprath Reihe, Vogel Verlag, Würzburg

Schwalbe, E. & H.-G. Maas (2006): *Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Abberation bei der Modellierung und Kalibrierung von FishEye-Aufnahmesystemen*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 122-129

Shortis, M. R. & H. A. Beyer (1996): *Sensor technology for digital photogrammetry and machine vision*. In: Atkinson K. B. (Ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing, Caithness, UK. 106-155

Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Aberration bei der Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmesystemen

Ellen SCHWALBE und Hans-Gerd MAAS

Zusammenfassung

Fisheye-Objektive unterscheiden sich in ihrer Abbildungsgeometrie grundsätzlich vom in der Photogrammetrie gebräuchlichen Modell der Zentralperspektive. Hemisphärische Fisheye-Aufnahmen lassen sich durch den Ansatz einer äqui-angularen Abbildung modellieren. Dieses Modell wird erweitert durch Zusatzparameter zur Kompensation von systematischen Fehlern, welche durch Abweichungen der physikalischen Realität des Objektivs vom mathematischen Grundmodell bedingt sind. Eine Testfeldkalibrierung durch räumlichen Rückwärtsschnitt auf Basis des entwickelten Modells ergab für eine hochauflösende Digitalkamera mit Fisheye-Objektiv ein Genauigkeitspotenzial in der Größenordnung von 0,1 Pixel. Mit dem entwickelten Modell und dem erzielten Genauigkeitspotenzial können durch Fisheye-Objektive generierte hemisphärische Aufnahmen eine interessante Alternative für eine Reihe photogrammetrischer Anwendungen bilden.

In Fisheye-Aufnahmen hochauflösender Digitalkameras sind Effekte der chromatischen Aberration in Form von Farbsäumen, welche zum Bildrand hin eine Breite von mehr als einem Pixel aufweisen, gut sichtbar. Dies stört neben dem visuellen Eindruck vor allem auch die Anwendung von Verfahren der multispektralen Klassifikation. Zur Kompensation der Effekte der chromatischen Aberration wird das Modell der äqui-angularen Abbildung im Rückwärtsschnitt durch bildkanalvariante Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung erweitert, welche eine Transformation aller Farbkanäle in eine gemeinsame Geometrie erlauben.

1 Einleitung

Die Verwendung von Fisheye-Objektiven kann für eine Reihe photogrammetrischer Anwendungen eine interessante Option darstellen. Fisheye-Objektive bieten den Vorteil eines 180°-Öffnungswinkels, welcher sich je nach Objektivbrennweise und Sensorgröße auf die Sensordiagonale, die große oder die kleine Sensorseite bezieht. Ein „echtes“, zirkulares Fisheye-Objektiv bietet einen Öffnungswinkel von 180° bezogen auf die kürzere Seite des Sensorformats und erlaubt hemisphärische Abbildungen. Im nicht-photogrammetrischen Bereich werden Fisheye-Objektive häufig für Überwachungsaufnahmen oder in der Effektfotografie eingesetzt. In der Photogrammetrie bieten sie sich vor allem für Innenraumaufnahmen an.

Die den hier gezeigten Arbeiten zugrunde liegende Anwendung hat die quantitative Beurteilung der Beleuchtungsbedingungen für Jungpflanzen im Waldbau zum Ziel (WAGNER 1998, SCHWALBE et al. 2004). Aus einer hemisphärischen Aufnahme mit vertikaler Auf-

nahmeachse zum Waldboden sollen strahlungsrelevante Bereiche des Kronendaches segmentiert werden. In Kombination mit dem aus Erdrotationsparametern berechenbaren Tages- und Jahresgang der Sonne kann daraus eine quantitative Angabe für die direkte Sonneneinstrahlung auf den Aufnahmepunkt abgeleitet werden.

Die geometrisch korrekte Auswertung der hemisphärischen Aufnahmen des Kronendaches bedingen die geometrische Modellierung und Kalibrierung des bei der Aufnahme verwendeten Fisheye-Objektivs, dessen Abbildungsmodell sich grundsätzlich von der in der Photogrammetrie gebräuchlichen Zentralperspektive unterscheidet. Statt der zentralperspektiven Abbildung finden wir hier das Grundmodell der äqui-angularen Abbildung, welches ggf. durch Zusatzparameter zu erweitern ist.

Abb. 1: Hemisphärische Kronendachaufnahme

Im Folgenden wird zunächst in Kapitel 2 das Grundmodell der äqui-angularen Abbildung gezeigt, welches dann – in Analogie zur Zentralperspektive in der konventionellen Nahbereichsphotogrammetrie – um Zusatzparameter zur Anpassung des mathematischen Grundmodells an die physikalische Realität erweitert wird. In Kapitel 3 werden die Resultate der Anwendung dieses Modells in einer Testfeldkalibrierung verschiedener Fisheye-Objektive gezeigt. In Aufnahmen aller im Rahmen der Untersuchungen getesteter Fisheye-Objektive waren Effekte der chromatischen Aberration mit bloßem Auge sichtbar. Diese stören nicht nur den visuellen Eindruck der Bilder, sondern beeinflussen auch die Resultate der Segmentierung hemisphärischer Kronendachaufnahmen mit dem Ziel der Extraktion strahlungsrelevanter Bereiche auf Basis einer multispektralen Klassifikation. Aus diesem Grunde wurde eine getrennte Kalibrierung der drei Spektralkanäle hemisphärischer Aufnahmen durchgeführt mit dem Ziel einer Bildkorrektur durch Resampling auf Basis der unterschiedlichen Modellparameter der einzelnen Spektralkanäle (Kap. 4).

2 Mathematisches Modell für Fisheye-Aufnahmen

Fisheye-Aufnahmen weichen – schon visuell erkennbar – vom herkömmlichen zentralperspektiven Modell, welches die Grundlage der Kollinearitätsbedingung darstellt, ab. Nahe liegend ist stattdessen eine Modellierung der Abbildungsgeometrie von Fisheye-Objektiven auf Basis einer äqui-angularen Abbildung. Das Grundprinzip dieser Abbildung ist selbsterklärend: Gleiche Einfallswinkelunterschiede übersetzen sich überall im Bild in gleiche Bildkoordinatenunterschiede (Abb. 2). Der Sensor wird dabei also nicht als Ebene, sondern als hemisphärisch gekrümmt betrachtet. Das mathematische Grundmodell der äqui-

angularen Abbildung wird in SCHWALBE (2005) detailliert beschrieben. Die Kamerakonstante wird darin durch den Radius des hemisphärischen Bildkreises ersetzt.

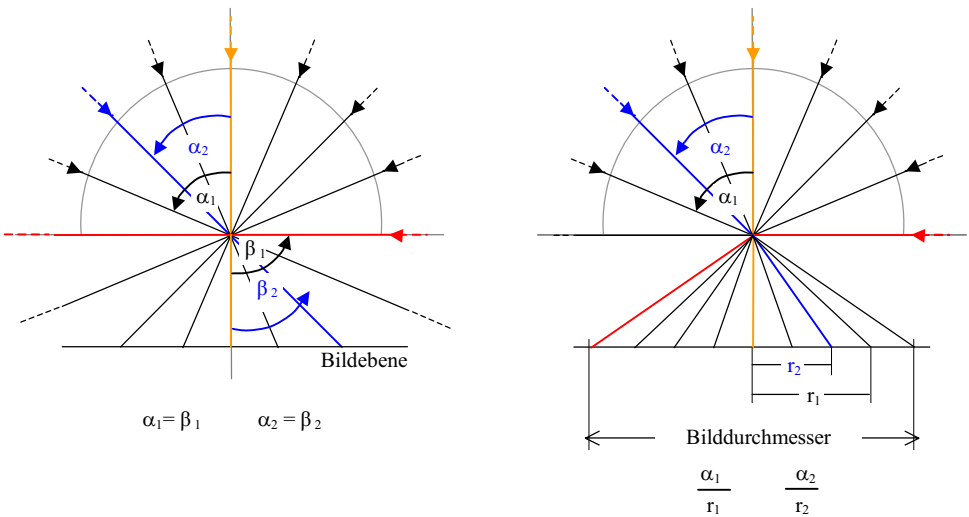


Abb. 2: Prinzip der zentralperspektiven und der äqui-angularen Abbildung

Zur Anpassung an die physikalische Realität der Abbildung und der damit notwendigen Kompensation systematischer Fehler wurde das Modell um Zusatzparameter erweitert. In Anlehnung an die Handhabung des zentralperspektiven Modells wurde hierzu der Parametersatz nach BROWN (1971) mit drei Parametern für die radial-symmetrische und zwei Parametern für die radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung in das Modell integriert. Zusätzlich wurden die häufig bei der Kalibrierung von Digitalkameras verwendeten Parameter für Affinität und Scherung (z. B. EL-HAKIM 1986) ins Modell eingeführt.

3 Implementation und Test

Das mathematische Modell der äqui-angularen Abbildung mit Zusatzparametern wurde zunächst im räumlichen Rückwärtsschnitt implementiert. Dieser erlaubt anhand von Aufnahmen eines Kalibrierfeldes (Abb. 3) die Kalibrierung der Kamera sowie Aussagen zum Genauigkeitspotenzial der Kamera bzw. zur Güte des Modells. Referenzkoordinaten der 140 Passpunkte des Kalibrierfeldes wurden mithilfe eines photogrammetrischen Industriemesssystems mit einer Standardabweichung von etwa 0,05 mm bestimmt.

Aufnahmen im Kalibrierraum wurden zunächst mit einer 4500 × 3000 Pixel Kodak DCS 14n und einem Fisheye-Nikkor 8 mm f/2.8 gemacht. Zusätzlich wurden Aufnahmen mit einem zweiten, baugleichen Fisheye-Nikkor 8 mm f/2.8 gemacht. Außerdem stand ein wesentlich kompakteres und preiswerteres Sigma EX 4,0/8 mm Objektiv für Testzwecke zur Verfügung. Für einen Vergleich der hochauflösenden Stillvideokamera mit einer Amateur-

kamera wurden zudem Aufnahmen mit einer Nikon Coolpix 990 mit Nikon Fisheye-Konverter FC-E8 gemacht.

Für die Kombination Kodak DCS 14n und Fisheye-Nikkor 8 mm f/2.8 ergaben sich ein Gewichtseinheitsfehler von 0,1 Pixel sowie die in Tabelle 1 gelisteten Kalibrierparameter:

Tabelle 1: Kalibrierparameter Kodak DCS 14n / Fisheye-Nikkor 8 mm f/2.8

Parameter		**Wert**	
Innere Orientierung	R	12,564 mm	± 0,0023 mm
	x_H	–0,141 mm	± 0,0007 mm
	y_H	–0,018 mm	± 0,0007 mm
Radial-symmetrische Verzeichnung	A1	$-6{,}2\cdot10^{-4}$	$\pm\ 4{,}4\cdot10^{-6}$
	A2	$1{,}4\cdot10^{-6}$	$\pm\ 5{,}7\cdot10^{-8}$
	A3	$-4{,}8\cdot10^{-9}$	$\pm\ 2{,}2\cdot10^{-10}$
Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung	B1	$1{,}0\cdot10^{-5}$	$\pm\ 1{,}4\cdot10^{-6}$
	B2	$8{,}9\cdot10^{-6}$	$\pm\ 1{,}6\cdot10^{-6}$
Affinität und Scherung	C1	$4{,}4\cdot10^{-5}$	$\pm\ 1{,}4\cdot10^{-6}$
	C2	$4{,}8\cdot10^{-5}$	$\pm\ 1{,}6\cdot10^{-6}$

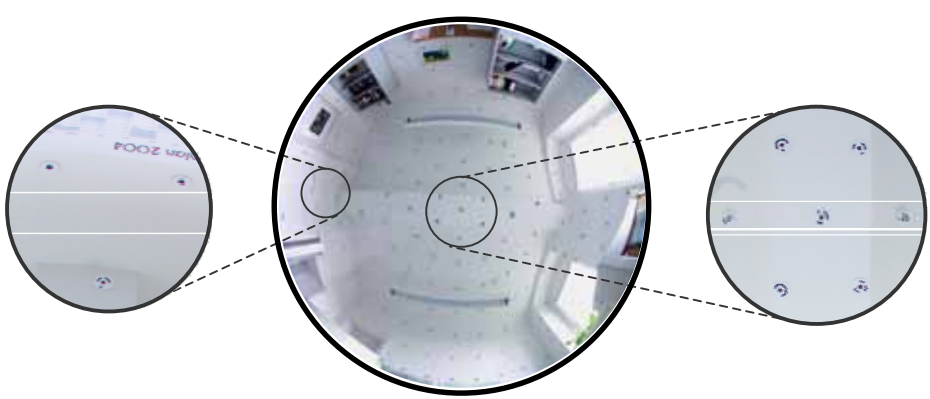


Abb. 3: Multi-funktionaler Fisheye-Kalibrierraum der TU Dresden

Der Vergleich der im Vorigen genannten Kamera-Objektiv-Kombinationen ergab die folgenden Resultate:

Tabelle 2: Kalibrierergebnisse für verschiedene Kamera-Objektiv-Kombinationen

Kamera/ Objektiv	Kodak DCS 14n/ Nikkor 8 mm f/2.8 (1)	Kodak DCS 14n/ Nikkor 8 mm f/2.8 (2)	Kodak DCS 14n/ Sigma 8 mm F4 EX	Nikon Coolpix 990/Nikon fisheye converter FC-E8
Sensorgröße	24 × 36 mm^2	24 × 36 mm^2	24 × 36 mm^2	5,32 × 7,18 mm^2
Bildkreisradius	11,5 mm	11,5 mm	11,0 mm	2,7 mm
Sigma-0	0,8 µm (0,09 Pixel)	1,1µm (0,13 Pixel)	0,9 µm (0,11 Pixel)	0,7 µm (0,19 Pixel)
Max. Betrag der radial-symmetr. Verzeichnung	1013 µm (127 Pixel)	1009 µm (126 Pixel)	1265 µm (158 Pixel)	190 µm (54 Pixel)
Max. Betrag der radial-unsymmetr. Verzeichnung	6 µm (0,8 Pixel)	8 µm (1,0 Pixel)	14 µm (1,8 Pixel)	5 µm (1,4 Pixel)

Das erzielte Genauigkeitspotenzial erreicht zwar nicht ganz die üblicherweise bei vergleichbaren Kameras mit zentralperspektiven Objektiven erzielten Werte, doch weisen die praktischen Tests Fisheye-Objektiven insgesamt ein gutes Genauigkeitspotenzial aus, welches Objektive dieser Art grundsätzlich für photogrammetrische Anwendungen qualifiziert und ein weites Anwendungspotenzial erschließt. Restsystematiken sind in Residuenbildern des Rüchwärtsschnittes nicht erkennbar (SCHWALBE 2005), was die Güte des mathematischen Modells bestätigt.

4 Berücksichtigung der chromatischen Aberration

Die Aufnahmen aller im Zuge der hier gezeigten Untersuchungen getesteten Fisheye-Objektive zeigen eine klar erkennbare chromatische Aberration, welche zum Bildrand hin einen Betrag von mehr als einem Pixel ausmacht. Diese chromatische Aberration zeigt sich in Form von störenden Farbsäumen bei der visuellen Betrachtung der Bilder. Sie beeinflusst aber auch die geometrische Genauigkeit von Messungen in Farbbildern. Dies betrifft die Qualität der in Kapitel 3 gezeigten Kalibrierungsergebnisse nur unwesentlich, weil hier nur schwarze Punkte auf weißem Hintergrund in Schwarzweißbildern gemessen wurden, die durch die Effekte der chromatischen Aberration lediglich in ihrer Scharfabbildung beeinträchtigt werden. Ausführliche Untersuchungen zur Beeinflussung der Genauigkeit von Kalibrierergebnissen durch die chromatische Aberration sind in HASTEDT et al. (2006) zu finden. Werden Bilder mit einer so deutlichen chromatischen Aberration jedoch als Basis für eine multispektrale Klassifikation verwendet, so können sich hier völlig falsche Klassifikationen von Pixeln ergeben.

Die Entstehung der in die Kategorie der Linsenfehler gehörenden chromatischen Aberration lässt einen systematischen Effekt erwarten, welcher sich bei der Betrachtung der Bilder bestätigt: Langwelliges rotes Licht wird in der Optik weniger stark gebrochen als grünes und blaues Licht; somit erscheint beispielsweise bei den in Abbildung 4 gezeigten Zielmarken ein nach innen versetzter roter Saum. Damit erscheint es nahe liegend, die chromati-

sche Aberration im geometrischen Modell als systematische Abweichung vom Modell der äqui-angularen Abbildung zu berücksichtigen. Dies kann relativ einfach realisiert werden, indem getrennte Rückwärtsschnitte mit den Bildpunktmessungen in den drei Farbkanälen gerechnet werden, bei denen sich dann die Bildkoordinaten aufgrund der chromatischen Aberration leicht unterscheiden. Eine stabilere Lösung ergibt sich durch einen kombinierten Rückwärtsschnitt auf Basis der Bildpunktmessungen in den drei Farbkanälen, bei dem die Parameter der äußeren Orientierung, der inneren Orientierung und der Affinität und Scherung für alle drei Kanäle gleich angesetzt werden und nur bildkanalvariante Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung eingeführt werden.

Mit diesen bildkanalvarianten Parametern der radial-symmetrischen Verzeichnung im kombinierten Rückwärtsschnitt ergeben sich für die Kombination Kodak DCS 14n und Fisheye-Nikkor 8 mm f/2.8 die in Tabelle 3 und Abb. 4 gezeigten Resultate:

Tabelle 3: Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung einer RGB-Kalibrieraufnahme

Objektiv	**Nikkor 8 mm f/2.8**			**Sigma 8 mm F4 EX**		
Farbkanal	Rot	Grün	Blau	Rot	Grün	Blau
A1	$-5{,}9 \cdot 10^{-4}$	$-6{,}2 \cdot 10^{-4}$	$-6{,}2 \cdot 10^{-4}$	$-5{,}8 \cdot 10^{-4}$	$-6{,}2 \cdot 10^{-4}$	$-6{,}3 \cdot 10^{-4}$
A2	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$	$-2{,}7 \cdot 10^{-6}$	$3{,}9 \cdot 10^{-6}$	$6{,}0 \cdot 10^{-6}$
A3	$-3{,}0 \cdot 10^{-9}$	$-4{,}8 \cdot 10^{-9}$	$-5{,}2 \cdot 10^{-9}$	$-4{,}1 \cdot 10^{-9}$	$-6{,}0 \cdot 10^{-9}$	$-6{,}8 \cdot 10^{-9}$
Max. Differenz Rot/Grün	2,57 Pixel			3,25 Pixel		
Max. Differenz Blau/Grün	0,59 Pixel			0,22 Pixel		

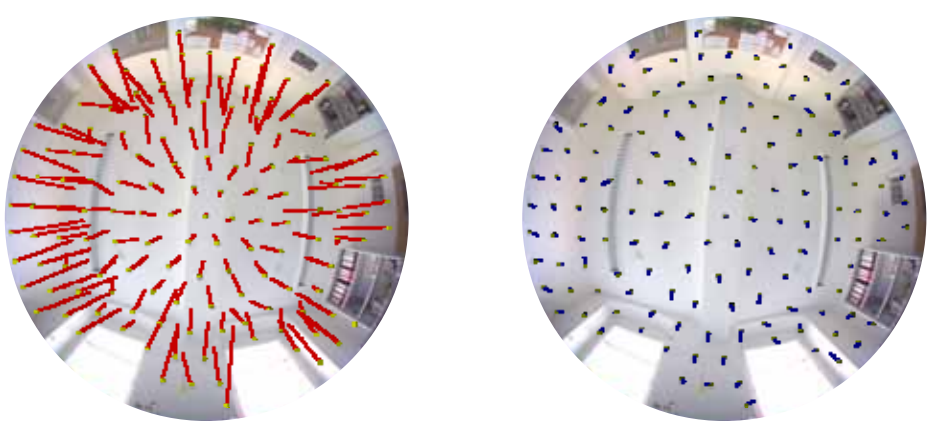


Abb. 4: Verzeichnungsunterschiede zwischen dem roten und grünen Kanal (links) und dem blauen und grünen Kanal (rec hts) beim Sigma 8 mm F4 EX (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

Die Resultate zeigen, dass der geometrische Effekt der unterschiedlichen radialsymmetrischen Verzeichnung der einzelnen Farbkanäle der Fisheye-Aufnahme bis zu 26 µm (oder 3,25 Pixel) differieren. Interessant ist dabei die Tatsache, dass speziell beim Sigma-Objektiv die Differenzen zwischen dem blauen und grünen Kanal keine Systematiken aufweisen und sehr gering sind, während die Differenzvektoren zwischen dem grünen und roten Kanal den Erwartungen entsprechend radial ausgerichtet sind und von der Bildmitte zum Bildrand hin zunehmen (vgl. Abb. 4). Ein Erklärungsansatz dafür ist, dass Effekte der chromatischen Aberration für den blauen und grünen Kanal bereits durch achromatisch gestaltete Linsen verringert werden. Dies beeinträchtigt jedoch nicht die grundsätzliche Vorgehensweise der Kalibrierung mit bildkanalvarianten Verzeichnungsparametern. Die Resultate der Kalibrierung erlauben eine Korrektur der Effekte der chromatischen Aberration durch ein Resampling der Farbkanäle (vgl. Abb. 5). Dabei können beispielsweise der rote und der blaue Farbkanal unter Nutzung der Verzeichnungsparameter auf die Geometrie des grünen Kanals transformiert werden. Das Resultat dieser Transformation ist ein Bild mit gefälligerer visueller Qualität, welches zugleich für eine multi-spektrale Klassifikation wesentlich besser geeignet ist. Störend wirken aber kantenverstärkende Effekte, die durch eine kamerainterne Vorverarbeitung der Bilder auftreten und zu Farbsäumen führen, die auch nach dem Resampling noch in den Bildern enthalten sind.

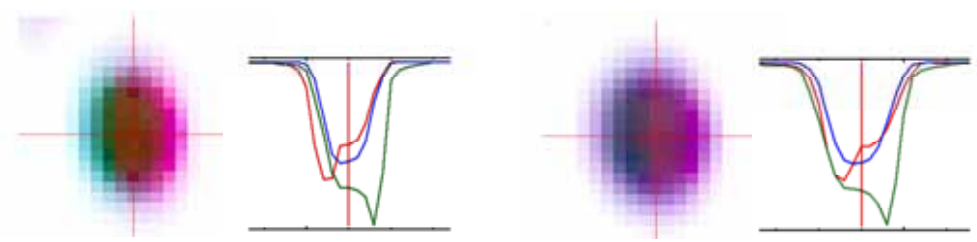


Abb. 5: Originalzielmarke (links) und entzeichnete Zielmarke (rechts) mit den jeweiligen Grauwertprofilen der einzelnen Farbkanäle (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

5 Ausblick

Die Arbeiten zur Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmen zeigen das Genauigkeitspotenzial derartiger Optiken und erlauben den Einsatz von Fisheye-Objektiven in photogrammetrischen Messsystemen. Eine Basis dazu ist gegeben durch einen kombinierten Rückwärts- und Vorwärtsschnitt oder vorzugsweise eine selbst-kalibrierende äquiangulare Bündelblockausgleichung auf Basis des gezeigten Modells.

Inwieweit die Effekte der chromatischen Aberration eine bildkanalvariante Behandlung der Verzeichnungsparameter bedingen, hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Bei der Nutzung des Farbinhalts von Bildern wird dies in der Regel der Fall sein. Zur Stabilität der Differenzen der Verzeichnungsparameter zwischen den Farbkanälen sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Wenn sich dabei die erwartete hohe Stabilität der Differenzen abzeichnet, kann die bildvariante Behandlung der Parameter in der Kalibrierung auch durch eine objektivspezifische Vorkorrektur ersetzt werden.

Durch die Verwendung eines Fisheye-Objektivs auf einer Rotationszeilenpanoramakamera ergibt sich die Möglichkeit der Aufnahme und geometrischen Auswertung hochauflösender vollsphärischer Bilder (BONNET 2005, SCHWALBE & SCHNEIDER 2005). Auch hier sind – prinzipbedingt allerdings nur in vertikaler Bildkoordinatenrichtung – Effekte der chromatischen Aberration zu erwarten, welche auf Basis der im Vorigen gezeigten Vorgehensweise beseitigt werden können.

6 Danksagung

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördert (Forschungsvorhaben 170801/33). Weiterhin danken wir dem Institut für Waldbau und Forstschutz der Technischen Universität Dresden für die Zusammenarbeit in diesem Projekt.

Literatur

Bonnet, G. (2005): *SPHERON – Panoramic camera and processing of panoramic data*. Proceedings 1st Panoramic Photogrammetry Workshop. Maas & Schneider (Eds.), International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, Part 5/W16

Brown, D. (1971): *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering, Vol. 37, No. 8

El-Hakim, S. F. (1986): *Real-Time Image Meteorology with CCD Cameras.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 11, 1757-1766

Hastedt, H., Luhmann, T. & W. Tecklenburg (2006): *Zur Nutzung von RGB-Farbkanälen für die hochgenaue 3DPunktbestimmung* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 112-121

Schneider, D. & H. G. Maas (2004): *Development and application of an extended geometrical model for high resolution panoramic cameras.* International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXV, Part B

Schwalbe, E., Maas, H.-G., Wagner, S. & M. Roscher (2004): *Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen*. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 13. 113-120

Schwalbe, E. (2005): *Geometric Modelling and Calibration of Fisheye Lens Camera Systems*. Proceedings 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop. Reulke & Knauer (Eds.), International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5/W8

Schwalbe, E. & D. Schneider (2005): *Design and testing of mathematical models for a full-spherical camera on the basis of a rotating linear array sensor and a fisheye lens*. Optical 3D Measurement Techniques VII: Grün, A. & H. Kahmen (Eds.), Vol. I. 245-254

Wagner, S., 1998: *Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis*. Agricultural and Forest Meteorology, Jg. 90, Nr. 1/2. 103-117

Hochauflösende Sichtstrahlkalibrierung für optisch abbildende Systeme am Beispiel Streifenprojektion

Michael SCHULTE, Thorsten BOTHE, Wansong LI, Achim GESIERICH,
Christoph VON KOPYLOW und Werner JÜPTNER

Einleitung

Viele Messverfahren basieren auf Koordinatenberechnung durch Triangulation. Beim Laserscanning markiert der Laser einen Punkt auf der Objektoberfläche, der von einer Kamera aufgenommen wird. Zur Koordinatenberechnung wird der Schnittpunkt des Laserstrahls und des Kamerasichtstrahls ermittelt. Bei der Stereophotogrammetrie wird ein Punkt von zwei Kameras beobachtet. Über den Schnittpunkt beider Sichtstrahlen lässt sich die räumliche Koordinate berechnen (Abb. 1a). Bei der Streifenprojektion wird eine der Kameras durch einen Projektor ersetzt. Dieser markiert auf der Objektoberfläche Punkte, die von der Kamera erfasst werden. Die Schnittpunkte der Projektorsichtstrahlen und Kamerasichtstrahlen ergeben die räumlichen Koordinaten der Messpunkte auf der Objektoberfläche (Abb. 1a). Um aus einem Schnittpunkt eine räumliche Koordinate berechnen zu können, muss der Verlauf der beiden Sichtstrahlen bekannt sein. Dazu werden jeweils die Strahlenstartpunkte und die Strahlenrichtungen benötigt. Die benötigten Daten werden durch eine Kalibrierung ermittelt (LUHMANN 2003).

In diesem Beitrag wird eine, neue nicht parametrisierte Sichtstrahlkalibrierung am Beispiel der Streifenprojektion beschrieben und der klassischen photogrammetrischen Kalibrierung gegenübergestellt. Anhand einer Ebenenmessung wird der Qualitätsunterschied zwischen der parametrisierten und der Sichtstrahlkalibrierung verdeutlicht.

1 Photogrammetrische Kalibrierung

Bei der photogrammetrischen Kalibrierung wird das geometrische Kameramodell durch die Parameter der inneren Orientierung bestimmt. Bei Verbänden aus Kameras und Projektoren wird zudem die relative Orientierung zueinander über drei Rotationen und drei Translationen bestimmt, genannt: Äußere Orientierung. Zur Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung wird eine Markerplatte (Abb. 3a) aus verschiedenen Positionen aufgenommen. Die Markerpunkte werden von einem Markererkennungsprogramm weitgehend automatisch erkannt, sodass Bildkoordinaten der Marker bekannt sind. Da auch die Objektkoordinaten bekannt sind, können über eine Bündelausgleichung mit den Kollinearitätsgleichungen (Formel (1) und (2)) die Parameter der inneren und äußeren Orientierung berechnet werden.

$$x_i = x_h - c \cdot \frac{R_{11}(X - X_0) + R_{21}(Y - Y_0) + R_{31}(Z - Z_0)}{R_{13}(X - X_0) + R_{23}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} \tag{1}$$

$$y_i = y_h - c \cdot \frac{R_{12}(X - X_0) + R_{22}(Y - Y_0) + R_{32}(Z - Z_0)}{R_{13}(X - X_0) + R_{23}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} \tag{2}$$

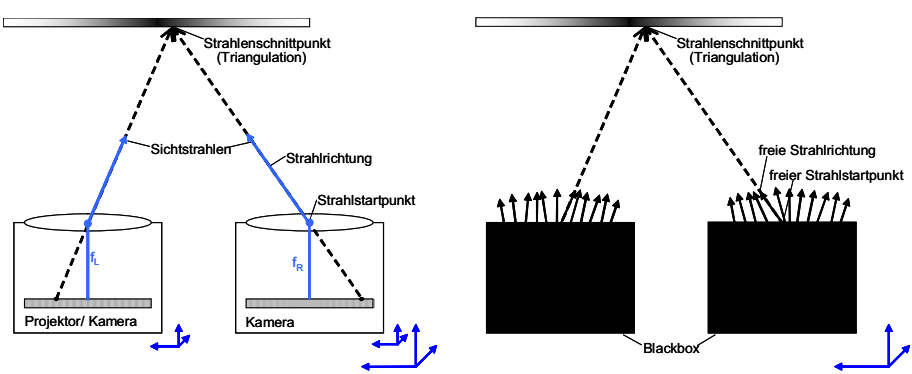
Die äußere Orientierung beschreibt die Lage von Kamera und Projektor im Raum und somit auch zueinander. Die Parameter der inneren Orientierung sind

- Kamerakonstante,
- Lage des Bildhauptpunktes,
- Radial-symmetrische Verzeichnung,
- Tangentiale asymmetrische Verzeichnung,
- Affinität und Scherung des Bildkoordinatensystems
- sowie je nach Modell Polynome höheren Grades.

Durch die parametrisierte Beschreibung kann der Ursprung und die Richtung der Sichtstrahlen berechnet werden. Diese Beschreibung ist geeignet für Objektive, die ideal verzeichnen. Stark verzeichnende Objektive können so nur unzureichend oder gar nicht beschrieben werden. Daher muss für die Kalibrierung solcher Objektive eine geeignete Methode gefunden werden. Dafür wurde am BIAS die Sichtstrahlkalibrierung entwickelt.

2 Sichtstrahlkalibrierung

2.1 Prinzip der Sichtstrahlkalibrierung

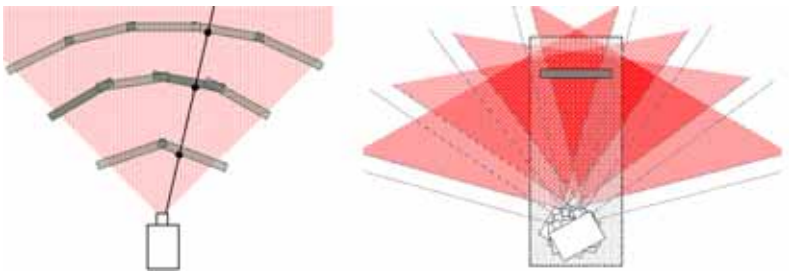


a) b)

Abb. 1: a) Koordinatenberechnung bei Streifenprojektion und Stereophotogrammetrie. Definition der Sichtstrahlen über photogrammetrische Kalibrierung durch innere und äußere Orientierung. b) Pixelweise Betrachtung eines Messsystems. Parameterlose Beschreibung der Sichtstrahlen durch freien Strahlstartpunkt und freie Strahlrichtung

Bei der Sichtstrahlkalibrierung wird für jedes Pixel ein eigener Sichtstrahl bestimmt. Die optischen Eigenschaften von Projektor und Kamera des Streifenprojektionssystems werden

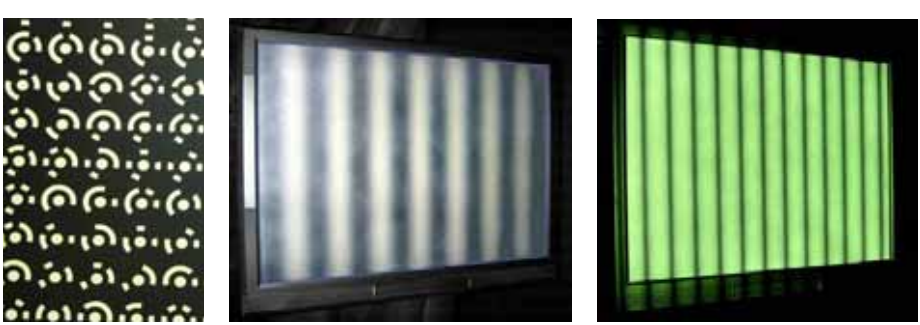
nicht modelliert, sondern das Messsystem wird als Blackbox betrachtet (Abb. 1b). Mit diesen Voraussetzungen ist es möglich, auch extreme Optiken, die parametrisiert schlecht zu beschreiben sind (z. B. Fischaugen), zu kalibrieren.



a) b)

Abb. 2: a) Bestimmung der Sichtstrahlen über Durchstoßpunkte durch mehrere Kalibrierebenen, b) Realisierung durch Kameradrehung statt Bewegen der Kalibrierebene

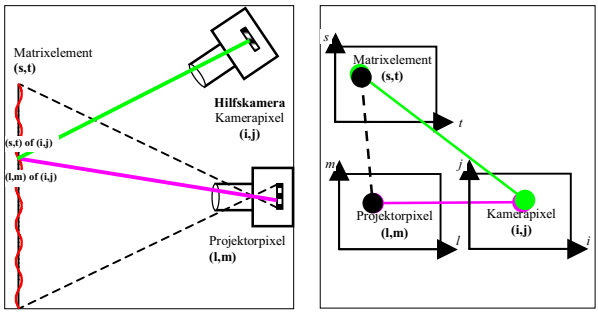
Für die Bestimmung der Sichtstrahlen müssen mindestes zwei Punkte auf dem Sichtstrahl bekannt sein. Für eine robustere Kalibrierung wird redundant mit mindestens drei Punkte gearbeitet (Abb. 2a). Da so leicht mehrere Millionen Punkte bestimmt werden müssen, muss eine geeignete Punktbestimmung gefunden werden.



a) b) c)

Abb. 3: a) Ausschnitt aus passiver Markerplatte, b) Monitor als aktive Markerplatte mit Phasenmessung zur Positionsbestimmung auf dem Monitor für eine Kamera, c) Phasenmessung mit einem Projektor auf dem ausgeschalteten Monitor

Wie in Kapitel 1 beschrieben wurde, wird in der photogrammetrischen Kalibrierung eine Markerplatte verwendet (Abb. 3a). Diese Markerplatte ist für die Sichtstrahlkalibrierung nicht geeignet, da die Punktdichte zu gering ist. Als Markerplatte wird daher ein Monitor verwendet. Auf dem Monitor läuft eine Absolutphasenmessung in horizontaler und vertikaler Richtung. So werden Positionen auf dem Monitor subpixelgenau bestimmt. Für die Projektorkalibrierung muss eine halbtransparente, diffus streuende Schicht auf dem Monitor aufgebracht werden (Abb. 3b) damit die Streifen des Monitors und auch die projizierten Streifen des Projektors (Abb. 3c) von der Kamera aufgenommen werden können.

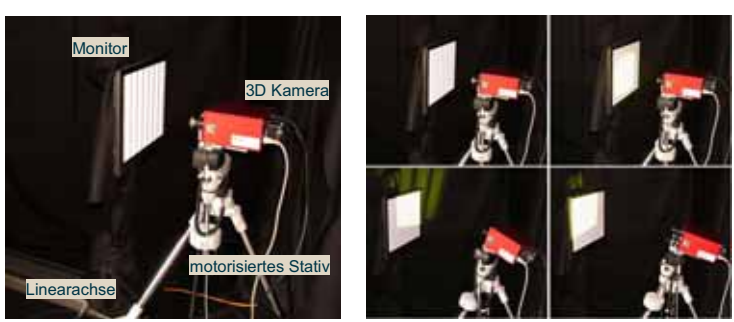


a) b)

Abb. 4: Positionsermittlung auf dem Monitor für eine Projektorkalibrierung mit einer Hilfskamera. a) Phasenmessung mit Monitor wie in Abb. 3b, dann Phasenmessung mit Projektor auf Monitor wie in Abb. 3c. Für Kamerapixel sind so jeweils ein Monitor und ein Projektorpixel bekannt. Variablensubstitution ergibt Beziehung Monitorpixel – Projektorpixel, Projektor – Inverse Kamera.

Die Durchstoßpunkte der Sichtstrahlen eines Projektors werden mithilfe einer Hilfskamera per Substitution bestimmt (Abb. 3b). Zuerst werden die Durchstoßpunkte auf dem Monitor für die Hilfskamera bestimmt, anschließend wird der Monitor auf Schwarz geschaltet und eine Absolutphasenmessung des Projektors ausgeführt (Abb. 3c). So ist für ein Kamerapixel jeweils ein Punkt auf dem Monitor und ein Punkt auf dem Projektor-LCD bekannt (Abb. 4a). Durch Variablensubstitution wird die Beziehung zwischen Projektor und Monitor hergestellt (Abb. 4b). Der Projektor kann dadurch wie eine inverse Kamera betrachtet werden und in die Kalibrierung eingehen. Da der verwendete Monitor wesentlich kleiner ist als eine Markerplatte und bei der Sichtstrahlkalibrierung eine hohe Punktdichte erforderlich ist, werden sehr viele Monitorpositionen benötigt. Darum muss die Kalibrierung geeignet automatisiert werden.

2.2 Kalibrierablauf

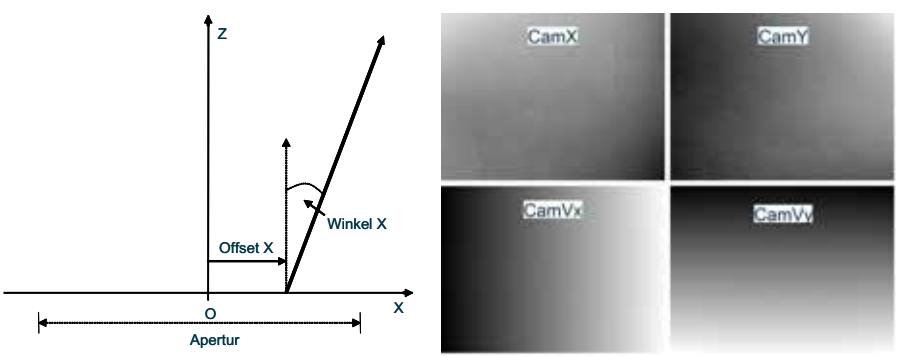


a) b)

Abb. 5: a) Kalibrieraufbau, b) Ablauf der Kalibrierung: oben links: Positionsbestimmung auf dem Monitor für die Kamera; oben rechts: Positionsbestimmung auf dem Monitor für den Projektor, unten: zwei weitere Positionen im Messbereich der 3D-Kamera

In Abbildung 5a ist der Kalibrieraufbau für das Streifenprojektionsmesssystem 3D-Kamera (BOTHE & OSTEN 2002, BOTHE & GESIERICH 2004) zu sehen. Um das große Messvolumen der 3D-Kamera zu füllen, wird das Messsystem gedreht und der Monitor verschoben (Abb. 2b). Für das vertikale Kippen und das horizontale Drehen wird ein motorisiertes Stativ verwendet. Der Abstand zwischen 3D-Kamera und Monitor wird durch eine Linearachse verändert. So wird eine kugelschalenförmige Füllung des Messvolumens erreicht (Abb. 2a). In Abbildung 5b ist ein Ausschnitt aus dem Kalibrierablauf zu sehen. Es wird immer eine Phasenmessung für die Kamera mit dem Monitor und anschließend eine Phasenmessung des Projektors auf dem Monitor durchgeführt. Hierbei arbeitet die Systemkamera gleichzeitig als Hilfskamera zur Kalibrierung des Projektors. In den beiden oberen Bildern in Abb. 5b ist die erste Position im Abstand von 25 cm zu sehen. Hier füllt der Monitor noch das gesamte Messfeld. Links ist die Positionsbestimmung auf dem Monitor für die Kamera zu sehen. Rechts die Positionsbestimmung für den Projektor. In den beiden unteren Bildern sind anhand der Projektormessung zwei weitere Messpositionen im Abstand von 50 cm zu sehen, die die Messfelder unten links und unten rechts füllen.

2.3 Ergebnis der Kalibrierung



a) b)

Abb. 6: a) Eindimensionale Sichtstrahlbeschreibung am Beispiel der X-Richtung mit Strahlrichtung in X und Offset in X, b) Speicherung der Sichtstrahlbeschreibung in Bildern, oben: Offset in X und Y Richtung, unten: Winkel in X- und Y-Richtung

Nachdem die Kalibriermessungen erfolgt sind und die Berechnung beendet ist, erhält man für jede Optik im Messsystem die Strahlenbeschreibung. Jeder Sichtstrahl wird über vier Parameter mit einem Winkel in X- (*CamVx*) und in Y-Richtung (*CamVy*) und einem Offset in X- (*CamX*) und Y-Richtung (*CamY*) beschrieben. In Abb. 6a ist dies am Beispiel eines Sichtstrahls in der XZ-Ebene beschrieben. Diese Ergebnisdaten werden in vier einzelnen Bildern gespeichert. So können für jedes Pixel die Sichtstrahlkoordinaten abgelesen werden. Für eine Visualisierung der Verzeichnungen werden mit den Parametern die Durchstoßpunkte (*Dx, Dy*) durch eine Ebene im Abstand *d* berechnet. Da für kleine Winkel gilt $\sin(\alpha) = \alpha$, kann in Formel (3) und (4) bei *CamVx* und *CamVy* der Tangens entfallen.

$$Dx = CamVx * d + CamX \tag{3}$$

$$Dy = CamVy * d + CamY \tag{4}$$

Zur Darstellung der Verzeichnung wird aus den Daten der Anteil des reinen Lochkamera-Modells entfernt, was näherungsweise der Entfernung von Offset und Rampe entspricht, also dem Polynom erster Ordnung. Ergebnis dieser Fits sind die Verzeichnungskomponenten (*Dx*, Dy**) für jedes Pixel. Über einen Polynomfit höherer Ordnung werden weiterhin die hochfrequenten Verzeichnungskomponenten (Dx**, Dy**) berechnet.

Aus den vektoriellen Einzelkomponenten (Dx*, Dy*) bzw. (Dx**, Dy**) wird die skalare Verzeichnungsamplitude D* bzw. D** berechnet:

$$D* = \sqrt{Dx*^2 + Dy*^2} \qquad D** = \sqrt{Dx**^2 + Dy**^2} \tag{5}$$

Die Verzeichnungsamplituden D* und D** werden farbkodiert in Abb.7 zur Darstellung der Verzeichnung verwendet.

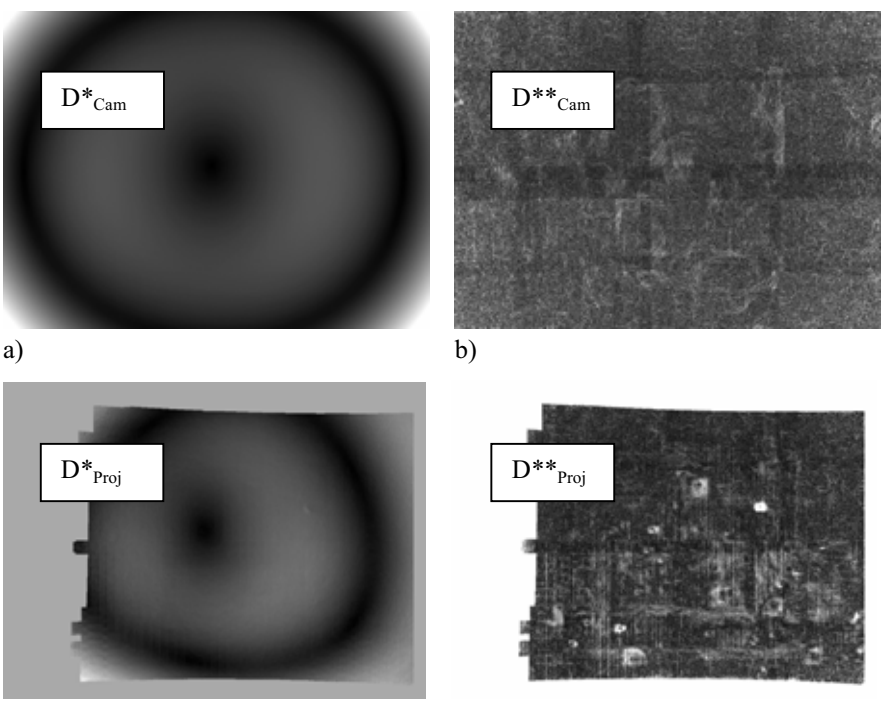
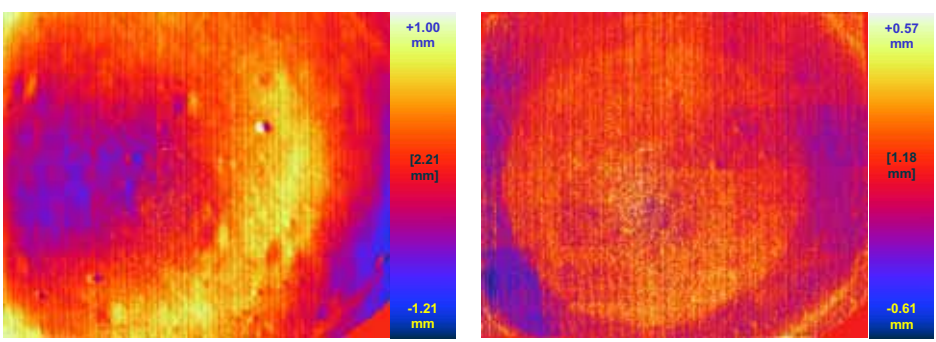


Abb.7: Visualisierte Kalibrierergebnisse. Gesamte Verzeichnung von Kamera (a) und Projektor (c). Nach Abzug der tieffrequenten Verzeichnung ist die hochfrequente Verzeichnung von Kamera (b) und Projektor (d) sichtbar.

In Abb.7a und c ist die gesamte Verzeichnung von Kamera und Projektor zu sehen. Das ist die typische Verzeichnung, die auch von einer parametrisierten Kalibrierung beschrieben werden kann, wobei die Unsymmetrien in Abb.7c bereits Probleme bei der polynomialen Beschreibung bereiten. Abb.7b und d zeigen die hochfrequenten Verzeichnungen. Hier sind deutlich Verzeichnungen zu erkennen, die eine modellhafte Beschreibung nicht kompensieren kann. Um einen empirischen Vergleich der Kalibrierungen durchführen zu können, wurde eine Ebenenmessung durchgeführt.

3 Ebenenmessung

Für den Vergleich der beiden Kalibrierungen wurde eine Ebene (Planität besser als 0,5 mm) mit der 3D-Kamera vermessen. Die Ebenenmessung wird mit der photogrammetrischen und der Sichtstrahlkalibrierung ausgewertet. Anschließend werden die Abweichungen von der Ebene dargestellt (Abb. 8). Abweichungen > 0,5 mm können als Kalibrierfehler gedeutet werden. Die 3D-Kamera verwendet zwei kurzbrennweitige, stark verzeichnende Objektive, um einen großen Messbereich zu ermöglichen. Bei Fehlern in der Kalibrierung ergeben sich aufgrund der kleinen Triangulationsbasis der 3D-Kamera große Auswirkungen auf die Ebenenabweichung.



a) b)

Abb. 8: Ergebnisse einer Ebenenmessung. Differenz zu einer Ebene. Alles > 0,5 mm ist Verzeichnung. a) Abweichung von der Ebene bei einer photogrammetrischen Kalibrierung; b) Abweichung von einer Ebene bei der pixelweisen Sichtstrahlkalibrierung

Wird die Ebenenmessung mit der photogrammetrischen Kalibrierung ausgewertet, sind im Differenzbild (Abb. 8a) systematische Fehler zu sehen. Alle Abweichungen, die größer als 0,5 mm sind, sind vom Messsystem verursachte Abweichungen. Mit einem Wertebereich von 2,2 mm ist die Abweichung von der Ebene sehr groß. Die Polynome der photogrammetrischen Kalibrierung sind nicht in der Lage, die tieffrequenten Verzeichnungen ausreichend zu beschreiben. Die Asymmetrie im rechten unteren Viertel in der Projektorverzeichnung in Abbildung 7c bewirkt ebenfalls in der Ebenenmessung eine starke Verzeichnung. Die hochfrequenten Verzeichnungen können von der parametrisierten Kalibrierung gar nicht beschrieben werden und führen zu den deutlich sichtbaren, hochfrequenten Artefakten, die mit den hochfrequenten Projektorverzeichnungen (Abb.7d) übereinstimmen.

Verwendet man für die Auswertung der Ebenenmessung die Sichtstrahlkalibrierung, erhält man die Ebenenabweichung wie in Abb. 8b. Hier ist zu sehen, dass die hochfrequenten Verzeichnungen fast vollständig verschwunden sind. Auch die durch die Asymmetrie verursachte, tieffrequente Verzeichnung ist beschrieben, allerdings ist eine neue ringförmige Verzeichnung zu erkennen. Die Ursache für diese Verzeichnung ist noch unklar und muss weiter untersucht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Sichtstrahlkalibrierung ist eine neuartige, hochauflösende, nicht-parametrisierte und vollständig automatisierbare Kalibrierung für verschiedenste optisch abbildende Messsysteme. Wie der Vergleich der herkömmlichen und der neuen Kalibrierungen in Abb. 8 gezeigt hat, ist die neue pixelweise Beschreibung eines Messsystems weit besser in der Lage, extreme Objektive wie die der 3D-Kamera zu beschreiben. Hochfrequente Verzeichnungen einer Kamera oder eines Projektors werden durch die neue Kalibrierung so gut beschrieben, dass diese Verzeichnungen in Messergebnissen einer Höhenvermessung nicht mehr auftauchen. Die Kalibrierung kann vollkommen automatisch ablaufen, da durch die Phasenmessung auf dem Monitor keine (möglicherweise fehlerbehaftete) Markererkennung erforderlich ist. Durch diese neue Kalibriermethode ist es nun möglich, beinahe jedes optisch abbildende System zu kalibrieren. So können z. B. hochwertige Optiken durch günstigere ersetzt und die gewünschte Genauigkeit durch softwareseitige Korrektur erreicht werden. Wie am Beispiel der 3D-Kamera gezeigt ist es so auch möglich, neuartige Messsysteme zu konstruieren, die mit der herkömmlichen photogrammetrischen Kalibrierung nicht ausreichend beschrieben werden können. Allerdings bleiben noch Dinge wie die Ursache der ringförmige Verzeichnung in Abb. 8b und der Einfluss einer Blendenänderung auf die Kalibrierung zu untersuchen.

Literatur

Bothe, T., Gesierich, A., Kopylow, C. von & W. Jüptner (2004): *3D-Kamera – ein miniaturisiertes Streifenprojektionssystem zur Formerfassung.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Bothe T., Osten, W., Gesierich, A. & W. Jüptner (2002): *Compact 3D-Camera.* Proc. SPIE Vol. 4778

Burke, J., Bothe, T., Osten, W. & C. Hess (2002): *Reverse engineering by fringe projection*. Proc. SPIE Vol. 4778

Luhmann T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Algorithmen

Speicherung von zeitkontinuierlichen Sensordaten (Laserscanner) am Beispiel Fahrerleistungsdatenbank

Frank EHRICH und Axel TENZER

Zusammenfassung

Bei der Verarbeitung von Sensordaten, insb. Laserscannerdaten, fallen umfangreiche Datenmengen an. Die Speicherung dieser Daten in einer Datenbank erfordern spezielle Techniken und Methoden. Gängige Ansätze zur Speicherung geospatialer Daten gehen von einer Indizierung der Daten anhand geometrischer Strukturen aus (R*-Bäume). In diesem Artikel wird die Möglichkeit dargestellt, bei dem Aufbau geeigneter Datenstrukturen auch andere, nicht geometrische Merkmale unter Nutzung von Techniken des klassischen Data Warehouses mit einzubeziehen.

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Fahrerleistungsdatenbank“ der Unfallforschung der Volkswagen AG wurden enorme Datenmengen aufgezeichnet. Über diese werden Analysen durchgeführt, um das Verständnis von normalen Fahrerverhalten zu vertiefen.

Wichtig hierbei war, die Daten möglichst in ihrer reinen, unverarbeiteten Form zu speichern, um Informationsverlust zu vermeiden. Verbesserte Auswertealgorithmen sollten also verbesserte Ergebnisse bringen.

Als Werkzeug zur Verwaltung der Daten wurde eine relationale Datenbank ausgewählt. Dieser Beitrag stellt die Ablage großer Datenmengen für Analysezwecke mithilfe von Techniken des Data Warehouses vor.

1.1 Das Projekt „Fahrerleistungsdatenbank“

Die Fahrerleistungsdatenbank der Volkswagen AG ist ein Instrument der Beobachtung normalen, unkritischen Fahrerverhaltens. Hierbei werden auf einer hochpräzise vermessenen Referenzstrecke im öffentlichen Straßenverkehr Probandenfahrversuche durchgeführt. Aufgabe der Probanden ist, so zu fahren, wie sie es gewohnt sind, also „normales Fahrverhalten“ zu zeigen. Die Fahrversuche finden mit dem ViewCar des DLR statt, einem instrumentierten Fahrzeug, das neben der Erfassung fahrdynamischer Daten auch eine Fahrumgebungserfassung zulässt. Die Fahrten werden als zeitkontinuierlicher Datensatz in einer relationalen Datenbank gespeichert. Die Fahrerleistungsdatenbank soll das Verständnis von Fahrerhandlungen vertiefen und der Entwicklung von Algorithmen für Fahrerassistenzsysteme dienen. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die Bereitstellung einer virtuellen Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme und deren Komponenten und Algorithmen (TENZER 2004).

1.1.1 Die Referenzstrecke

Geographisch in der Nähe von Wolfsburg gelegen wurde ein ca. 55 km langer Rundkurs im öffentlichen Straßenverkehr definiert und mit differentiellem GPS durch das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Braunschweig vermessen (NIEMEIER & THOMSEN 2003). Die Vermessung der Referenzstrecke beinhaltet die Aufnahme aller Verkehrsleiteinrichtungen (Leitlinien, Mittellinien, Haltebalken, Sperrflächen) nach Art und Lage und die Einmessung aller Verkehrszeichen nach Position und Ausrichtung zur Fahrbahn.

1.1.2 Analysefahrten

Um das Fahrerverhalten oder genauer die Systemantwort des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt zu ermitteln, werden auf der Referenzstrecke Probandenfahrversuche im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt. Hierzu wird sich der Hilfe eines mit verschiedenen Sensoren bestückten Fahrzeuges bedient. Ziel ist es, neben den Reaktionen des Ego-Fahrzeuges auf den Fahrerwunsch auch die veränderliche Fahrumgebung zu erfassen sowie durch Videoaufzeichnungen einen optischen Eindruck der aufgenommenen Fahrszenen zu vermitteln. Die Versuche werden mit dem ViewCar des DLR Braunschweig durchgeführt. Eine weitergehende Beschreibung des ViewCar gibt SUIKAT et al. (2003). Dieses Fahrzeug verfügt über einen mobilen Laserscanner, sechs optische Kameras, ein Facelab-System, ein Physiolog, ein Ortungssystem für die Bestimmung des GPS-Signals des Ego-Fahrzeugs sowie einer Spurfindung.

Alle während der Fahrt aufgenommenen Daten werden mit einem gleichen, gemeinsamen Zeitsignal versehen und auf einen Datenträger geschrieben.

1.2 Datenvolumen

Tabelle 1 zeigt die Sensoren mit der Anzahl der Datensätze pro Testfahrt.

Tabelle 1: Sensoren des ViewCar und die Anzahl der zugehörigen Datensätze pro Testfahrt

Sensor	**# Datensätze**
Laserscanner	463.0000
Physiolog	250.0000
Facelab	370.000
Spurerkennung	370.000
Ortungssystem	350.000
Lenkwinkelsensor	350.000

Das weitaus größte Datenvolumen der Sensordaten liefert der Laserscanner. Pro Testfahrt liefert der Laserscanner ca. 4.630.000 Datensätze, das ist ca. das Doppelte als der zweitplatzierte Sensor und mehr als das 10fache als der nächstfolgende Sensor.

Die Fahrerleistungsdatenbank dient zum Verständnis normalen, unkritischen Fahrerverhaltens. Um dieses zu erreichen, muss man die Datengrundlage auf eine breite statistische

Basis stellen. Daher wurden zunächst 70 Testfahrten durchgeführt, geplant weitere Testfahrten zu sammeln, um die statistische Basis immer weiter zu verbessern.

Bei 70 Analysefahrten bedeutet dies also ein Datenvolumen von ca. 320.000.000 Datensätzen.

Es gilt also Techniken zu finden, die eine solche Datenmenge handhabbar machen.

In der betriebswirtschaftlichen Datenverarbeitung existiert für analyseorientierte, große Datenbanken den Begriff des Data Warehouses, der im Folgenden näher untersucht werden soll.

2 Data Warehouse

2.1 Definition

Ziel eines Data Warehouses ist die Gewinnung von Informationen und Informationszusammenhängen aus dem bestehenden Datenbestand durch Verdichtung oder Aggregation unter Gesichtspunkten, die zum Datenerhebungszeitpunkt u. U. (noch) nicht bekannt sind (SCHNEIDER & WERNER 2000)

Die eigentlichen Anwendungsgebiete eines Data Warehouses liegen im betriebswirtschaftlichen Bereich, z. B. Logistik und Service im produzierenden Gewerbe, Kunden und Marktanalysen im Handel, Risikoabschätzung und -analyse, ...

Unterschiede bei den Definitionen finden sich vor allem im generellen Zweck eines Data Warehouses sowie im Umfang und Umgang mit den Daten im Data Warehouse.

Inmon, bekannt als „Vater des Data Warehouse“, definierte den Begriff folgendermaßen (INMON & HACKATHORN 1994):

> *„Ein Data Warehouse ist eine themenorientierte, integrierte, chronologisierte und persistente Information eines Unternehmens, um Manager bei Entscheidungsprozessen zu unterstützen.“*

Inmon betont hier sehr deutlich den betriebswirtschaftlichen Charakter von Data-Warehouse-Systemen. Andere Definitionen sind weniger restriktiv, wie z. B. bei Zeh (ZEH 2003)

> *„Ein Data Warehouse ist ein physischer Datenbestand, der eine integrierte Sicht auf die zugrunde liegenden Datenquellen ermöglicht.“*

Ergänzend kann noch die Sicht von Kimball (KIMBALL 2002) angeführt werden:

> *„…, the operational systems are where the data is put in, and the data warehouse is where we get the data out.“*

Entscheidend bei den neueren Definitionen ist, dass der Zweck des Data Warehouses beliebig ist, also nicht mehr betriebswirtschaftlich orientiert ist.

2.2 Techniken der Datenspeicherung

2.2.1 Tablespace-Layout

Ein *Tablespace* ist ein logischer Bereich der Datenbank, in dem eine oder mehrere Datendateien liegen. Datendateien sind der physische Speicherplatz der Datenbank – die Bereiche, in denen Tabellen und Indizes gespeichert werden. Die Verteilung und der Aufbau von Tablespaces spielen eine entscheidende Rolle für die Performance und Administrierbarkeit eines Data Warehouses. Für das Anlegen der Tablespaces sollte Folgendes beachtet werden:

1. *I/O-Performance*: Das Thema I/O-Performance wird oftmals durch eine geeignete Hardware-Architektur (RAID) bearbeitet.
2. *Administrierbarkeit*: Zum einen sollte man vermeiden, zu viele Tablespaces zu erstellen, um die Übersichtlichkeit zu behalten, zum anderen ist es aber sinnvoll, große Tabellen oder aber – wenn sie partitioniert sind – große Tabellenbereiche in eigenen Tablespaces zu speichern, da dadurch das Backup und Recovery vereinfacht wird.
3. *Aufteilung von Partitionen*: Werden Partitionen in einzelnen Tablespaces abgelegt, so kann sich dies auf die Performance der Abfragen auswirken, da ggf. nicht die gesamte Datenbank, sondern nur einzelne Partitionen durchsucht werden müssen. Auch lassen sich die Tabellen besser verwalten, da sich die Daten in Partitionen viel einfacher laden und löschen lassen (s. Kap. 2.2.2).
4. *Transportable Tablespaces* bieten die Möglichkeit, einen Tablespace zu klonen, um ihn von einer Datenbank in eine andere Datenbank zu kopieren. Dadurch entfällt der mühsame Weg, einen Export, Import oder Ähnliches durchzuführen.

2.2.2 Partitionierung

Partitionierung bezeichnet das Zerlegen der Zeilen einer Tabelle in mehrere Teile. Durch das Verteilen einer großen Tabelle auf kleinere Partitionen erreicht man verschiedene Ziele:

1. *Verbesserung der Performance*, da bei Abfragen ggf. nur eine Partition und nicht die gesamte Tabelle durchsucht werden muss.
2. *Einfachere Administration*, da die Daten in kleineren Elementen hinterlegt sind, lassen sich die Daten in den Partitionen viel einfacher laden und löschen.
3. *Schnelleres Backup- und Recovery* durch verkleinerte Datenelemente

2.2.3 STAR-Schema

Das STAR-Schema ist eine besondere Form eines Datenmodells, dessen Ziel nicht die Normalisierung ist, sondern eine Optimierung auf effiziente Leseoperationen.

Die Daten in einem Data Warehouse sind nach Fakten und Dimensionen getrennt. Faktentabellen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie ein sehr großes Datenvolumen haben (mehrere Hundertmillionen Datensätze) und über entsprechende Attribute klassifiziert werden. Die Dimensionstabellen beschreiben dann diese Attribute.

Die Bezeichnung Sternschema rührt daher, dass die Tabellen sternförmig angeordnet werden: Im Zentrum steht eine Faktentabelle, um die sich mehrere Dimensionstabellen gruppieren.

Eine komplette Erläuterung des Sternschemas würde hier den Rahmen sprengen. Nähere Informationen hierüber findet man z. B. in KIMBALL (2002).

3 Die Datenbank

Die Fahrerleistungsdatenbank ist als eine relationale Datenbank realisiert. Aufgabe ist es, ein offenes Datenbanksystem zu schaffen, das weder in Zahl und Umfang der speicherbaren Fahrversuche noch in der Erweiterbarkeit für zukünftige Messgrößen und Variablentypen begrenzt sein soll. Die Daten müssen so in der Datenbank abgelegt werden, dass sowohl der Import der Daten als auch die Abfrage der Daten in „üblicher Zeit“ möglich ist.

3.1 Datenmodell

Das Datenmodell der Fahrerleistungsdatenbank ist grundsätzlich in zwei Bereiche aufgeteilt, zum einen in einen statischen Bereich, in dem die Referenzstrecke gespeichert wird. Hier verändern sich die Datenmengen fast gar nicht, neue Daten werden nur aufgenommen, wenn die Referenzstrecke sich verändert (z. B. durch Baustellen) oder neue Referenzstrecken vermessen werden.

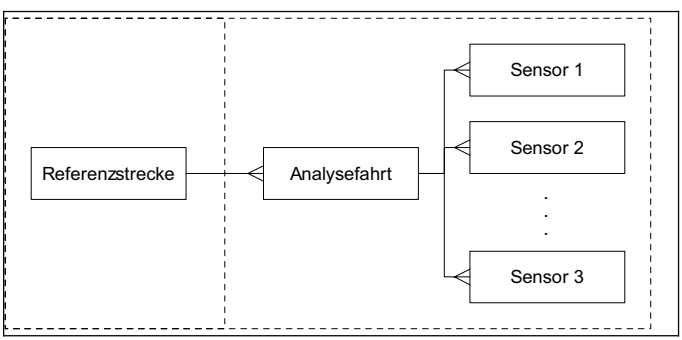


Abb. 1: Konzeptionelles Datenmodell

Der andere Bereich beinhaltet die Daten der Analysefahrten mit den zugeordneten Sensoren. Wie bereits in Kapitel 1.2 beschrieben, wächst hier das Datenvolumen sehr stark mit jeder Analysefahrt.

Jede Analysefahrt ist einer Referenzstrecke zugeordnet, die Datenbank ist also in der Lage auch weitere Referenzstrecken aufzunehmen. Jeder Analysefahrt sind die Sensorereignisse zugeordnet, hierbei ist jeder Sensor in einer eigenen Tabelle abgelegt.

3.2 Partitionierung und Tablespace-Layout

Eine einfache Speicherung der Daten, insb. der Sensordaten, ohne Verwendung der Techniken wie in Kapitel 2 in einer (relationalen) Datenbank, führt zu enormen Performanceproblemen, die mit der Anzahl der durchgeführten und gespeicherten Analysefahrten

wächst. Dies erschwert zumindest die Auswertungen und die Administration der Daten, wenn sie diese nicht sogar unmöglich macht.

Es gilt also, die Daten gemäß der Divide-And-Conquer-Methode in „handhabbare" Datenportionen aufzuteilen.

Die Aufteilung der Daten in eigene Tablespaces für Referenzstreckendaten und Analysefahrtdaten ist offensichtlich und auch richtig. Sie bringt aber für das angestrebte Ergebnis nur bedingt eine Lösung. Die großen Datenmengen, die durch Analysefahrten anfallen, sind nach wie vor nicht aufgeteilt.

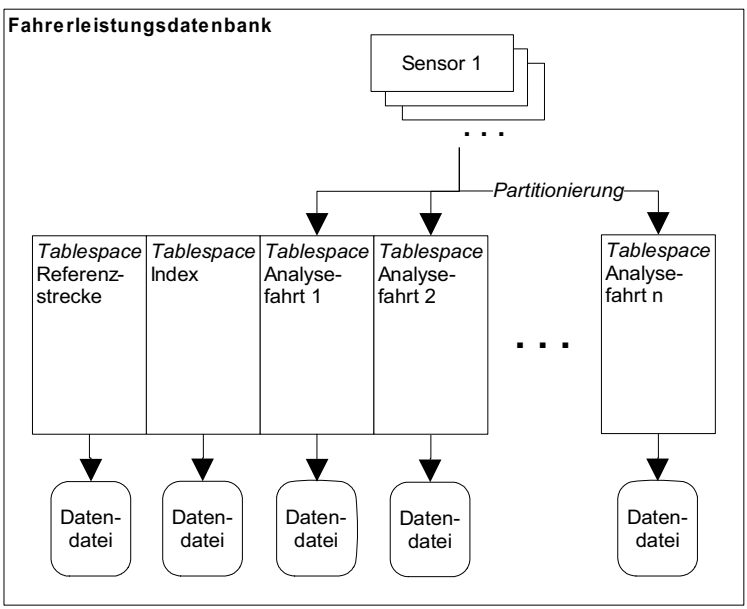


Abb. 2: Partitionierung und Tablespace-Layout Fahrerleistungsdatenbank

Alle Tabellen der Testfahrten, insb. die Sensortabellen, wurden partitioniert, jede Testfahrt wurde in einer eigenen Partition gespeichert. Die jeweiligen Partitionen aller Tabellen, die zu einer Testfahrt gehören, werden gemeinsam in einem Tablespace gespeichert. Es werden also die Testfahrten mit allen zugehörigen Daten, wie z. B. der Situationsklassifikation, in eigenen Tablespaces abgelegt. Jeder Tablespace zu einer Analysefahrt liegt in einer eigenen Datendatei. Zusätzlich existiert ein eigener Tablespace für globale Indizes.

Aus diesen Analysefahrt-Tablespaces gibt es nur eine einzige Verknüpfung zu anderen Tabellen, zur Referenzstrecke. Hiermit wird gespeichert, auf welcher Referenzstrecke die Fahrt durchgeführt wurde.

Durch die gewählte Partitionierung mit dem Tablespacelayout gewinnt man einige Vorteile:

- *Bessere Performance*: Insbesondere bei Abfragen, die sich nur auf eine Testfahrt beziehen, muss nur noch die zugehörige Testfahrt durchsucht werden.

- *Einfachere Verwaltung*: jede Testfahrt kann separat verwaltet werden, es können einzelne Testfahrten einzeln gesichert und gelöscht werden. Durch das spezielle Layout sind die Tablespaces auch transportierbar („*transportable*“), d. h. die Datendateien können einzeln, beispielsweise zum Sichern, mit allen zugehörigen Informationen kopiert werden.

3.3 Verknüpfen der Sensorereignisse

Viele Auswertungen der Analysefahrten basieren auf einer Verknüpfung verschiedener Sensorereignisse. Alle Objekte oder Eigenschaften, die von einem Sensor gemessen werden, unterliegen zeitlich kontinuierlichen Veränderungen, die von dem Sensor diskret abgetastet werden.

Die Abtastzeitpunkte der einzelnen Sensoren sind unterschiedlich. Für eine Verknüpfung der Sensorereignisse müssen also die diskreten Abtastzeitpunkte nachträglich durch Interpolation der Messwerte synchronisiert werden. Sind die Abtastzeitpunkte synchronisiert, so können diese direkt verknüpft werden. Dieses erfolgt in Form eines STAR-Schemas mit den interpolierten Messwerten der anderen Sensorereignissen (Abb. 3).

Es werden also für Auswertungen dynamisch für ein Auswertefenster Daten in dem STAR-Schema erzeugt.

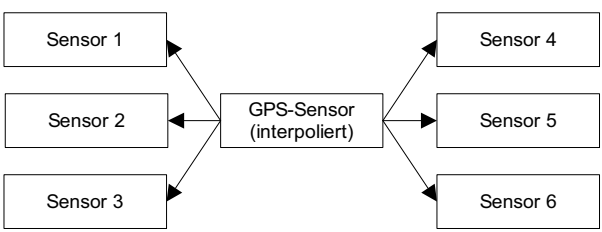


Abb. 3: Verknüpfen der Sensorereignisse mithilfe des STAR-Schemas

4 Zusammenfassung

Durch die Abstraktion des betriebswirtschaftlichen Anwendungsrahmens des Data-Warehouse-Ansatzes wurden hieraus einige Techniken auf einen technischen Anwendungsfall mit spatio-temporalen Daten angewendet.

Insbesondere fanden bisher Techniken zur Ablage Anwendung, die die Administration sehr erleichtert und die Performance von Auswertungen erheblich beschleunigt haben.

Es lässt sich also sagen, dass der Aufbau einer sehr großen technischen, spatialen Datenbank (> 1 Terabyte) nach den Konzepten des Data Warehouses ein weiterer wichtiger Baustein in der Verarbeitung solch großer Datenmengen ist.

Zwei weitere Entwicklungsstränge bieten sich zukünftig:

- Zum einen muss die Ablage weiter verbessert werden. Hierfür bieten sich insbesondere spezielle Indexierungen (wie R*-Bäume, ..., siehe auch BRINKHOFF 2005) an, um ins-

besondere dem spatialen Charakter der Daten stärker Rechnung zu tragen. Als nächstes muss man dann den temporalen Charakter stärker mit einbeziehen.

- Zum anderen muss man die Auswertemechanismen weiter untersuchen. Nachdem die Daten bereits Data-Warehouse-orientiert abgelegt wurden, sollte man jetzt die Auswertemöglichkeiten eines Data Warehouses näher untersuchen. Zusätzlich werden Techniken des Data Mining mit einfließen.

Literatur

Brinkhoff, T. (2005): *Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Inmon, W. H. & R. D. Hackathorn (1994): *Using the Data Warehouse.* John Wiley & Sons

Kimball, R. & M. Ross (2002): *The Data Warehouse Toolkit. The Complete Guide to Dimensional Modeling*. John Wiley & Sons

Niemeier, W. & S. Thomsen (2003): *GPS in der Unfallforschung*. In: DGON-Symposium Positionierung und Navigation POSNAV, Dresden, 18./19.3.2003

Tenzer, A. (2004): *Die Fahrerleistungsdatenbank der Volkswagen AG als Werkzeug zur Beobachtung von Fahrerverhalten*, VW VDI Gemeinschaftstagung 27.10.2004

Suikat, R., Rataj, J., Schäfer, H. & R. Rollke (2003): *ViewCar – den Fahrer verstehen.* In: Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. VDI-Tagungsband. VDI Verlag, Düsseldorf

Zeh, T. (2003): *Data Warehousing als Organisationskonzept des Datenmanagements. Eine kritische Betrachtung der Data-Warehouse-Definition von Inmon*. In: Informatik. Forschung und Entwicklung, Band 18, Heft 1

Der Einsatz von Techniken aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz bei bildgebenden Sensorsystemen

Alexander REITERER

Zusammenfassung

In der modernen Ingenieurgeodäsie werden zunehmend berührungslose Online-Messsysteme gefordert. Eine flexible Technik zur berührungslosen, hochgenauen Online-Erfassung von 3D-Strukturen (z. B. Deformationsmessung, hochgenaue Objektrekonstruktion) ist die Vermessung mithilfe von bildgebenden Sensoren. Der zunehmende Einsatz und die zunehmende Komplexität solcher Messsysteme erfordert auch neue Ansätze für ihre Steuerung, die Auswertung sowie die Interpretation der erfassten Daten. Im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) besteht eine Reihe von Techniken, die für eine effiziente Lösung solcher Probleme eingesetzt werden können.

1 Einleitung

Im Jahre 1956 haben führende Computerwissenschaftler, Psychologen, Linguisten und Philosophen am Dartmouth College im Zuge eines Kongresses den Begriff „Artificial Intelligenz“ (künstliche Intelligenz) geschaffen. Hintergrund war es, ein präzises Modell des menschlichen Denkens zu erstellen – die Schaffung eines „Elektronenhirns“ sollte Computern die Fähigkeiten des biologischen Vorbildes geben. Die ersten Pionierjahre waren von Optimismus geprägt. Widergespiegelt wird dies unter anderem durch das „General Problem Solver“-Projekt, bei dem ein universelles Computerprogramm zur Lösung unterschiedlicher Planungsaufgaben geschaffen werden sollte. Das Projekt scheiterte an der unüberschaubaren Anzahl von möglichen Plänen.

Das Verhalten einer Maschine wurde damals als intelligent angesehen, wenn diese den sog. *Turing-Test* bestand, d. h. wenn das Verhalten von der entsprechenden Leistung eines Menschen nicht zu unterscheiden war (GÖRZ et al. 2000).

Computer haben heute ein außergewöhnliches Leistungspotential erreicht – sie rechnen genauer als der Mensch, sind bei logischen Spielen meist besser und sind vor allem bei sämtlichen Rechenaufgaben schneller. Probleme haben sie aber bis heute bei der Bewältigung von unklaren, ihnen unbekannten Situationen.

Anfangs orientierte man sich bei der Erforschung neuer Techniken der KI sehr stark am biologischen Vorbild. So prägte beispielsweise VON NEUMANN den Begriff des *zellulären Automaten.* Auf Grundlage dieser Entwicklungen entstanden Techniken wie künstliche neuronale Netze oder genetische Algorithmen. Zusammengefasst wurden solche Techniken unter den Begriff des *Soft Computing*. Im Gegensatz dazu entstanden Techniken, welche mit starr vorgegebenen Regeln arbeiten (z. B. wissensbasierte Systeme); diese werden unter dem Begriff des *Hard Computing* zusammengefasst.

Durch die Notwendigkeit vorangetrieben, die schier unendliche Flut von Daten im Internet zu erschließen, entstanden in den letzten Jahren Techniken, die auf sog. semantischen Netzen aufbauen (z. B. *Agenten*[1]).

In Zukunft wird künstliche Intelligenz weniger in einzelnen Programmen stecken als vielmehr in ihrem Verbund. Als Beispiel seien hier sog. *Smart Devices* angeführt. Sie stellen winzige Prozessoren und Sensoren dar, die in diversen Endgeräten fest integriert sind und untereinander „telematisch kommunizieren" (VERBMOBIL 2006).

Dieser Artikel soll einen allgemeinen Überblick über die Techniken der KI und spezielle Anwendungen in der Bildverarbeitung geben. Es ist hier jedoch nicht möglich, eine vollständige Abhandlung darzulegen; Schwerpunkt soll auf die für die Bildverarbeitung und Messtechnik wichtigsten Methoden gelegt werden. Für einen umfangreichen Überblick sei auf die Literatur verwiesen (z. B.: GÖRZ et al. 2000).

2 Techniken der KI

Heute können eine Unzahl von unterschiedlichen Techniken aus dem Bereich der KI in der Bildverarbeitung und Messtechnik eingesetzt werden. Wir möchten uns hier auf die drei bekanntesten Gruppen beschränken: künstliche neuronale Netze, wissensbasierte Systeme und evolutionäre Algorithmen (bzw. genetische Algorithmen).

2.1 Künstliche neuronale Netze

Unter einem künstlichen neuronalen Netz (KNN) versteht man die Kombination einer nichtlinearen Funktion mit einem Lern-Algorithmus. Der Lern-Algorithmus dient dazu, aus vorhandenen Eingangs- und gewünschten Ausgangswerten alle Parameter der Funktion zu bestimmen (ZELL 1994). Ein KNN besteht aus einer Vielzahl von gleichen Einzelteilen, den sog. künstlichen Neuronen, und stellt somit eine Realisierung des konnektionistischen Paradigmas dar.

Jedes KNN besteht in seiner minimalen Form aus einer Eingabeschicht (*input layer*) und einer Ausgabeschicht (*output layer*) – meist ist noch eine sog. Zwischenschicht (*hidden layer*) vorhanden. Die Zwischenschicht determiniert die Fähigkeit des Netzes zur Verallgemeinerung. Die Anzahl der Neuronen in der Zwischenschicht muss groß genug sein, um die gestellte Aufgabe zu erfüllen, sie muss aber gleichzeitig klein genug sein, um eine sinnvolle Verallgemeinerung durch das Netz zu ermöglichen (ZELL 1994). Die Anzahl der Neuronen in der Zwischenschicht bestimmt die Verknüpfungen innerhalb des Netzes und damit die Komplexität des Netzes[2]. Die Neuronen der Eingabeschicht sind mit den Neuronen der Ausgabeschicht über die Zwischenschicht mit gewichteten Verknüpfungen verbunden (s. Abb. 1).

---

[1] Solche Programme agieren vollständig autonom und passen sich selbständig den Wünschen und Bedürfnissen eines menschlichen Nutzers an. Verbunde solcher Agenten werden *Multi-Agenten-Systeme* genannt.

[2] In einem Netz mit einer Zwischenschicht ist die Anzahl der Verknüpfungen proportional zu der Anzahl der Neuronen in der Zwischenschicht.

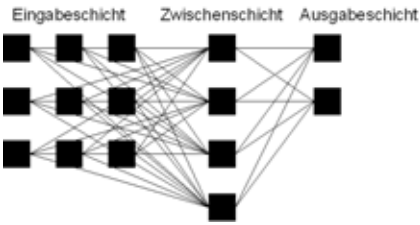


Abb 1: Vollständig verbundenes KNN (3×3 – 1×4 – 1×2)

Für jede Verknüpfung innerhalb des Netzes muss ein Gewicht berechnet werden. Für diese Berechnung braucht man eine ausreichend große Anzahl von Trainingsdaten und einen geeigneten Trainingsalgorithmus. Der bekannteste und am weitesten verbreitete Trainingsalgorithmus ist der *Backpropagation-Algorithmus*. Er arbeitet als iteratives Verfahren und ermittelt die Konfiguration der Gewichte im Netz, indem er die Fehlersumme über alle Trainingsmuster minimiert. Weitere bekannte Trainingsalgorithmen sind das *Kohonen* oder das *Monte-Carlo-Verfahren*. Auf die vollständige Beschreibung der Trainingsalgorithmen soll hier verzichtet werden; es sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (ZELL 1994, GÖRZ et al. 2000).

In der Praxis besteht oft das Problem, dass die Eingangsdaten redundante Informationen enthalten und diese auch nicht durch geeignete Codierung aufgehoben werden können. Um diesem Problem entgegen zu wirken, sollte das KNN die „Filterung" der redundanten Informationen vornehmen können. Erreicht werden kann dies durch ein geeignetes Netz-Design, sodass die Zwischenschicht weniger Neuronen als die Eingabeschicht besitzt.

KNN eignen sich vor allem für Probleme, bei denen man eine ausreichend große Menge von (Trainings)-Daten zur Verfügung hat und keine genaue Kenntnis über den algorithmischen Zusammenhang zwischen diesen und den gewünschten Ausgangsdaten; der Zusammenhang zwischen Eingabe- und Ausgabedaten soll gelernt werden.

Typische Aufgaben für künstliche neuronale Netze in der Bildverarbeitung sind Bildklassifikation, Merkmalsklassifikation oder Mustererkennung.

2.2 Wissensbasierte Systeme

Wissensbasierte Systeme (WBS) unterscheiden sich in ihrer Architektur grundsätzlich von Programmen, welche in einer konventionellen Programmiersprache (Java, C, C++, u. v. a. m.) implementiert wurden. Zu den Hauptkomponenten eines wissensbasierten Systems (Abb. 2) zählen: Wissensbasis, Inferenzkomponente, Benutzerschnittstelle, Erklärungskomponente und Wissenserwerbskomponente.

Die Wissensbasis enthält das Problemwissen in deklarativer Form. Dieses Wissen wird durch die Inferenzkomponente verarbeitet, wobei neues Wissen in Form von Fakten abgeleitet wird. Die Benutzerschnittstelle muss zumindest in einer minimalen Form vorhanden sein. Zusätzlich kann jedes wissensbasierte System über eine Wissenserwerbskomponente, welche die Akquisition neuen Wissens erleichtern soll, und über eine Erklärungskomponente, welche dem Benutzer Auskunft über die konkrete Lösungsfindung geben soll, verfügen (GOTTLOB et al. 1990, STEFIK 1998).

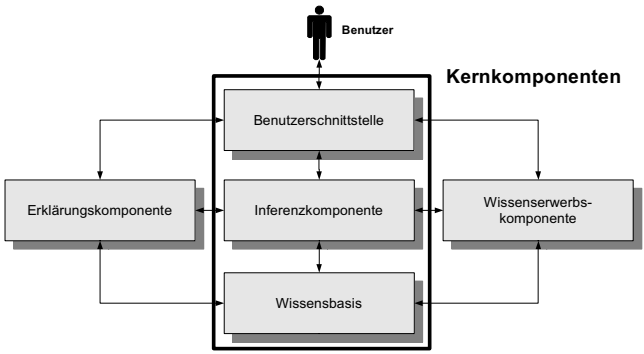


Abb. 2: Architektur eines WBS (GOTTLOB et al. 1990)

Vorteil eines wissensbasierten gegenüber einem herkömmlichen Ansatz ist vor allem die klare Trennung von Problemwissen und Wissensverarbeitung, d. h. dem Programmcode an sich. Erweiterungen und Modifikationen der Wissensbasis sind dadurch wesentlich leichter möglich. Ein weiterer Vorteil ist, dass Expertenwissen häufig in Form von Regeln vorhanden ist. Dieses Wissen kann ohne Konvertierung in die Wissensbasis eingebracht werden.

Für die praktische Implementierung wissensbasierter Systeme existieren verschiedene Ansätze (prozedurale Methoden, objektorientierte Methoden, logikbasierte Methoden u. a.) und verschiedene Softwarehilfsmittel, z. B. Clips, Ilog u. a. (CLIPS 2006, ILOG 2006).

Zu den verbreitetsten Methoden zählen sicher die regelbasierten Ansätze. Ein regelbasiertes System besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: dem so genannten Arbeitsspeicher (working memory, WM) und der Regelbasis (rule memory). Der Arbeitsspeicher ist eine Sammlung von einzelnen Typen sowie deren Instanzen. Die eigentlichen Elemente des Arbeitsspeichers (working memory elements) sind dann konkrete Instanziierungen. Der zweite Teil eines regelbasierten Systems ist die Regelbasis. Eine Regel ist grundsätzlich in zwei Teile unterteilt, nämlich in den Bedingungsteil (lefthand side, LHS) und den Aktionsteil (righthand side, RHS). Im Bedingungsteil stehen die so genannten Vorbedingungen, welche für das Ausführen der Regel erfüllt sein müssen. Erst wenn alle Vorbedingungen erfüllt sind, wird der Aktionsteil der Regel ausführbar.

Beispiel einer solchen Regel:

```
(defrule NAME
   (Vorbedingung 1)  (Vorbedingung 2)  (...)  (Vorbedingung n)
  =>
   (Aktion))
```

Wissensbasierte Systeme lassen sich in der Bildverarbeitung unter anderem sehr gut für diverse Konfigurationsaufgaben einsetzen. Beispiele hierfür sind die Konfiguration von Bildvorverarbeitung (s. Kap. 3.1) und die Konfiguration von Punktfindungsalgorithmen (REITERER et al. 2004).

2.3 Evolutionäre Algorithmen (genetische Algorithmen)

Evolutionäre Algorithmen orientieren sich direkt am Evolutionsmodell der Natur. *Darwins* Hypothese war, dass die Selektion die treibende Kraft für die Evolution und für Weiterentwicklung bzw. Differenzierung der Individuen verantwortlich ist. Aber erst die molekularbiologische Sichtweise hat uns die Details für diesen Prozess gezeigt. Demnach codiert die DNA (Desoxyribonucleid Acid) sämtliche Informationen, die den Phänotyp (das Individuum) charakterisieren, angefangen von seiner morphologischen Gestalt bis hin zu seinem Verhalten. Das Lebensalter wird nur indirekt durch die DNA bestimmt, indem gewisse Verfahren (z. B. die Selektion) das Überleben der einzelnen Individuen beeinflussen.

Wichtigster Punkt für eine algorithmische Beschreibung des evolutionären Modells ist die Vermehrung; mit ihrer Hilfe kann *Mutation* und *Crossover* (die Variation gegenüber den Elternindividuen) umgesetzt werden. Vereinfacht gesagt kann also jeder Algorithmus, der eine Variation durchführt und das „Bessere" überleben lässt, als eine Nachbildung der Evolution gesehen werden. Dies kann aber nur als eine übergeordnete Strategie gesehen werden – zu vage und zu weit gefasst ist diese Definition. Ein evolutionärer Algorithmus sollte ein stochastisches Optimierungsverfahren sein[3], bei dem die *Selektion* und/oder *Variation* zufällige Einflüsse darstellen.

Heute gibt es im Wesentlichen zwei Entwicklungsgruppen für evolutionäre Algorithmen: die Evolutions-Strategen und die Vertreter der genetischen Algorithmen. Wir wollen im Folgenden nur auf die genetischen Algorithmen eingehen.

John Holland gilt als Begründer der sog. *genetischen Algorithmen*. Er legte in seinem Buch die Grundlage für sämtliche in den nachfolgenden Jahren entwickelten Ansätze (HOLLAND 1975). Der Ablauf eines genetischen Algorithmus ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abb. 3: Funktionsweise eines genetischen Algorithmus (POLHEIM 2000)

Genetische Algorithmen eignen sich in der Bildverarbeitung für sämtliche Probleme der Optimierung. Beispielhaft sei hier auf die Optimierung der Punkterfassung und des Matchings hingewiesen (z. B. EBNER 1998).

Eine detaillierte Abhandlung des Funktionsprinzips evolutionärer und genetischer Algorithmen findet sich in GERDES et al. (2004) und POLHEIM (2000).

[3] Im Gegensatz zur klassischen Optimierung finden evolutionäre Algorithmen das Maximum und nicht das Minimum.

3 Anwendungen

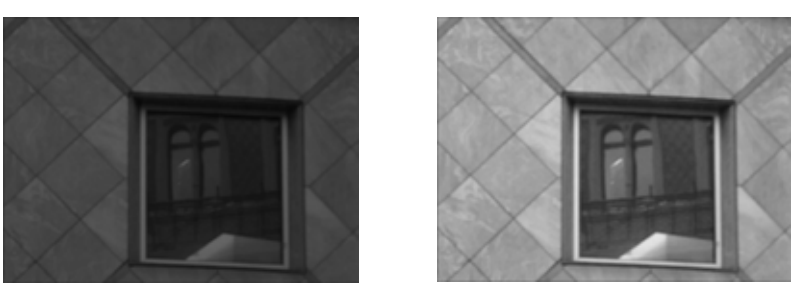
Um den Einsatz von Techniken aus dem Bereich der KI besser verständlich zu machen, sollen nachfolgend zwei Beispiele aus dem praktischen Einsatz erläutert werden.

3.1 Steuerung von Bildvorverarbeitungsprozessen mithilfe eines wissensbasierten Systems

Eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung vieler Bearbeitungsprozesse im Bereich der *„Computer Vision"* ist eine ausreichende Bildqualität. Oft ist es im praktischen Einsatz nötig, die Qualität vorliegender digitaler Bilder durch entsprechende Bildbearbeitungsverfahren zu verbessern.

Abb. 4: Architektur der wissensbasierten Bildvorverarbeitung (REITERER et al. 2003)

In REITERER et al. (2003) wurde ein System vorgestellt, welches auf der Basis extrahierter Bildmerkmale (statistische Bildanalyse) notwendige Bildaufbereitungsalgorithmen auswählt bzw. kombiniert (s. Abb. 4). In seinem Kern besteht das System aus drei Komponenten: (1) dem Bildanalysesystem, (2) den Bildaufbereitungsalgorithmen und (3) dem WBS. Das Problemwissen wurde in Form eines Regelwerkes implementiert; als Programmiersprache für das WBS wurde Clips gewählt. Das entwickelte System wurde an über 120 Bildern erprobt und lieferte größtenteils gute bis sehr gute Ergebnisse. In allen Fällen konnte die Bildqualität deutlich gesteigert werden und für eine nachfolgende Anwendung von Punkterfassungsmethoden optimiert werden (s. Abb. 5).



a) b)

Abb. 5: a) Stark unterbelichtete Aufnahme, b) Aufnahme nach der wissensbasierten Bildbearbeitung (REITERER 2004)

3.2 Punkterkennung/-wiederfindung mit künstlichen neuronalen Netzen

Ein sehr wesentlicher Arbeitsschritt bei bildgebenden Messsystemen ist die Erfassung von Objektpunkten. Vereinfacht ausgedrückt beruht ein solcher Prozess auf der Erfassung von Bildpunkten und der darauf folgenden Umrechnung in das Objektkoordinatensystem[4]. Unabhängig von der Erfassungs- bzw. Berechnungsmethode müssen die Punkte in den Bildern identifiziert werden. Dieser Prozess kann im einfachsten Fall manuell erfolgen oder vollständig automatisiert mithilfe geeigneter Algorithmen. In der klassischen Bildverarbeitung erfolgt die automatisierte Erfassung mithilfe sog. *Interest Operatoren*. Für eine Beschreibung der Funktionsweise solcher Methoden sei auf die Literatur verwiesen (FÖRSTNER 1991).

Eine Methode zur Punkterfassung mithilfe von künstlichen neuronalen Netzen beruht auf der Überführung des Problems in eine Klassifikationsaufgabe. Bildbereiche werden extrahiert und durch das KNN in „interessanter Punkt/Bereich“ oder „nicht interessanter Punkt/Bereich“ eingeteilt. Die Größe des extrahierten Bildbereiches sollte dabei mit der Größe der zu identifizierenden Punkte übereinstimmen (typische Größen könnten 6 × 6 oder 8 × 8 Pixel sein).

Abb. 6: Durch ein KNN erfasste Messmarken. Kennzeichnung durch dunkle Quadrate (Foto: Jafar A. Parian, ETH-Zürich)

Das entwickelte KNN arbeitet mit einer 6 × 6-Eingangsmatrix, einer 1 × 20-Zwischenschicht und einer 1 × 2-Ausgangsschicht und ist als vollständig vorwärtsverkettetes Netz ausgeführt. Für das Training wurde der oben genannte *Backpropagation-Algorithmus* auf Basis synthetischer Trainingsdaten verwendet. Ein zufrieden stellendes Training wurde bereits nach ca. 50 Trainingszyklen erreicht. In Abbildung 6 ist das Ergebnis eines solchen KNN dargestellt.

[4] Die Erfassung kann mit einem Sensor und Distanzgeber erfolgen (WALSER 2004) oder mit zwei Sensoren (gebräuchliches Verfahren in der Photogrammetrie).

4 Schlussbemerkung und Ausblick

Dieser Artikel gab einen groben Überblick über Techniken aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz, welche heute bei Problemen der digitalen Bildverarbeitung und Messtechnik eingesetzt werden können. Es zeigt sich sehr deutlich, dass mit diesen neuen Verfahren in den verschiedensten Bereichen sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Vor allem in der Steuerung, Konfiguration und Optimierung haben Beispiele in der Praxis das Potenzial dieser Techniken aufgezeigt.

Für die Zukunft scheint es aus Sicht des Ingenieurs/Benutzers wichtig, dass anwenderfreundliche Tools auf den Markt kommen, die es auch dem „Nicht-Experten" erlauben, solche Systeme zu implementieren.

Literatur

CLIPS (2006): http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html

Ebner, M. (1998): *On the Evolution of Interest Operators using Genetic Programming.* First European Workshop on Genetic Programming, The University of Birmingham

Förstner, W. (1991): *Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung.* DGK, Vol. C, Nr. 370, München

Gerdes, I., Klawonn, F. & R. Kruse (2004): *Evolutionäre Algorithmen.* Vieweg Verlag, Wiesbaden

Görz, G., Rollinger, C.-R. & J. Schneeberger (2000): *Handbuch der künstlichen Intelligenz.* Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München

Gottlob, G., Früwirt, T. & W. Horn (1990): *Expertensysteme.* Springer Verlag, Wien/New York

Holland, J. H. (1975): *Adaptation in Natural and Artificial Systems.* The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan

ILOG - White Paper (2006): http://www.ilog.com

Polheim, H. (2000): *Evolutionäre Algorithmen.* Springer Verlag, Wien/New York

Reiterer, A. (2004): *A Knowledge-Based Decision System for an On-line Videotheodolite-based Multisensor System.* Dissertation, Technische Universität Wien

Reiterer, A., Kahmen, H., Egly, U. & T. Eiter (2003): *Knowledge-Based Image Preprocessing for a Theodolite Measurement System.* In: Optical 3-D Measurement Techniques VI – Vol. I, Grün & Kahmen (Eds), Zürich. 183-190

Stefik, M. (1998): *Introduction to Knowledge Systems.* Morgan Kaufmann, San Francisco

Verbmobil (2006): http://verbmobil.dfki.de

Walser, B. (2004): *Development and Calibration of an Image Assisted Total Station*. Dissertation, ETH-Zürich

Zell, A. (1994): *Simulation neuronaler Netze*. Addison Wesley Longman Verlag, Oldenburg

Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken

Steffen SCHELLER und Danilo SCHNEIDER

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die Entwicklung von Algorithmen für eine zwei- und dreidimensionale Modellierung von geometrischen Primitiven aus Laserscannerdaten in extrahierten Schnittprofilen vorgestellt. Als Testdatensatz wurde eine Laserscannerpunktwolke des Dachstuhls des Bautzener Doms verwendet (Abb. 1). Zur Extraktion der Balken wurden Methoden entwickelt und implementiert, welche im zweidimensionalen Ansatz die gesamte Punktwolke automatisch in Schnittprofile zerlegt und einzelne Balken (d. h. Rechtecke) detektiert und segmentiert. Die anschließende Modellierung wird mit einer 2D-Houghtransformation und einer Ausgleichung der erhaltenen Gerade realisiert. Im Resultat werden einzelne Balkenbegrenzungen in den verschiedenen Schnittprofilen erhalten. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist stark von der Punktdichte und der Streuung der Punkte in den Schnittebenen abhängig. Etwa 75 % aller extrahierten Daten konnten für eine Weiterverarbeitung (Generierung eines Stabwerkmodells) verwendet werden.

Eine dreidimensionale Auswertung kann zum einen basierend auf der Zusammensetzung der einzelnen zweidimensionalen Profile und zum anderen über eine direkte Extraktion von Ebenen im dreidimensionalen Raum erfolgen. Hierfür wurde eine direkte Geometrieextraktion entwickelt, beruhend auf einer 3D-Houghtransformation, welche Ebenen in dreidimensionalen Punktwolken detektieren kann. Ähnliche Ansätze finden sich in RABBANI (2004). Durch die Verschneidung der detektierten und modellierten Ebenen kann die Oberfläche der Balken des Dachstuhls beschrieben werden. Durch diesen Ansatz ist es möglich, ein vollständiges dreidimensionales Modell zu generieren, aus dem sich außerdem die Topologiebeziehungen zwischen den Balken ableiten lassen. Die geometrischen und topologischen Informationen können für eine statische Berechnung der Tragwerkskonstruktion des Dachstuhls weiterverwendet werden.

1 Einleitung

1.1 Laserscannerdaten vom Dachstuhl Bautzener Dom

Die verwendete Punktwolke wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Frau A. Bienert, TUD (2004), mit einem Laserscanner *Riegl LMS-Z420i* aufgenommen (Abb. 1). Diese Punktwolke besteht aus Aufnahmen von zwölf Standpunkten und beinhaltet ca. 34 Millionen Punkte. Die Registriergenauigkeit der einzelnen Standpunkte zueinander beträgt 5−7 mm. Die gesamte Punktwolke des Dachstuhls des Bautzener Doms diente als Datengrundlage zur Separierung und Detektion der einzelnen Balken. (Abb. 2)

Technische Daten	
Laserklasse	1
Wellenlänge	Nahes Infrarot
Strahldivergenz	~ 0,25 mrad
minimale Reichweite	2 m
Maximale Reichweite	1000 m (p > 80 %)
	350 m (p > 10 %)
Messungen pro Sekunde	max. 1200
Winkelauflösung	~ 8 mgon
Mittl. Streckengenauigkeit	< 7 mm

Abb. 1: Laserscanner *Riegl LMS-Z420i*

Abb. 2: Laserscanneraufnahme von einem Standpunkt im Dachstuhl Bautzener Dom, dargestellt als zweidimensionales Intensitätsbild (Screenshot *RiscanPro*)

1.2 Datenaufbereitung

Die Datenakquisition wurde mit der scannereigenen Software *RISCAN PRO* durchgeführt. In dieser Software erfolgten auch die Registrierung und der Export der Messdaten. Als Exportformat diente eine Textdatei mit jeweils einem Koordinatentripel pro Zeile. Diese Datei stellt die Grundlage für alle weiteren Verfahrensschritte in den erstellten C++-Programmen dar.

Der entwickelte Algorithmus arbeitet ohne Standpunktinformationen und realisiert zunächst eine Zerlegung der Punktwolke in Schnittprofile (Scheiben), welche automatisch nach einer vorgegebenen Ebene ausgerichtet werden. Der erste Schritt für eine automatische Aufteilung einer Punkwolke in Schnittprofile ist die Definition einer beliebigen Ebene im Raum und einer bestimmten Schnittbreite. Über die Objektgröße wird die Lage aller weiteren Schnittprofile so berechnet, dass sie parallel zu der zuvor definierten Ebene sind (Abb. 3 links).

Die Zuordnung der Punkte zu den Schnittprofilen erfolgt durch eine Abstandsbestimmung zwischen einem Schnitt und einem Punkt. Jeder Punkt wird auf seine Entfernung zur Ebene getestet. Alle Messpunkte, die innerhalb des vordefinierten Abstandes liegen, werden im 2D-Auswertungsansatz orthogonal auf die jeweilige Schnittebene projiziert (Abb. 3 rechts).

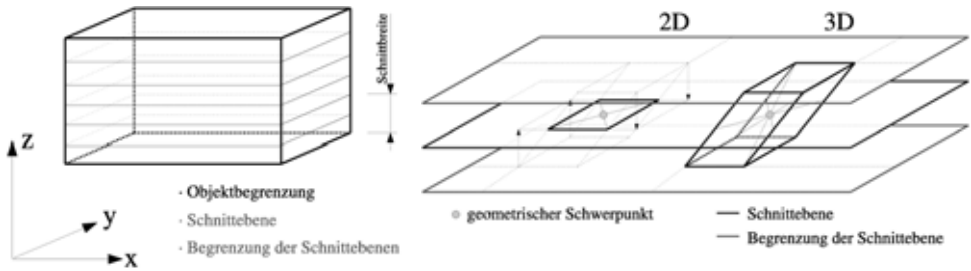


Abb. 3: Schnittprofilaufteilung (parallel zur x,y-Ebene) (links), Unterteilung der 2D-und 3D-Auswertung eines Balkens, 2D-Auswertung durch Projektion aller Datenpunkte auf die Schnittebene, bei der 3D-Auswertung werden alle originalen Datenpunkte in einem Schnitt verwendet (rechts)

1.3 Ausgabeformate

In den ersten Verfahrensschritten der Programmerstellung zeigte es sich, dass das Einlesen aus einer Textdatei sehr zeitintensiv ist. Zur Lösung dieses Problems wurde die Textdatei vor allen Berechnungen in eine Binärdatei konvertiert.

Zur Visualisierung der Ergebnisse und der Laserscannerpunktwolke wurde die Skriptsprache VRML 2.0 (Virtual Reality Modeling Language) verwendet. Diese Skriptsprache ist ursprünglich eine dreidimensionale Schnittstellenentwicklung für das World Wide Web. Die VRML-Ausgabedateien der Ergebnisse werden automatisch von dem in dieser Arbeit erstellten C++-Programm generiert.

2 Separierung von Punkt-Clustern

Die Separierung der Punkt-Cluster erfolgt in den einzelnen Schnittprofilen. Hierbei wird unterschieden zwischen einer 2D- und einer 3D-Auswertung (Abb. 4). In dieser Arbeit wird die Größe einer Punktwolke über einen umschließenden Quader definiert. Alle Kanten des Quaders sind jeweils zu einer Koordinatenachse parallel. Die damit entstandene Objektgrenze wird bei jeder eingelesenen Punktwolke bestimmt und dient als räumlicher Bezug. Die Objektgrenze ist zudem Grundlage zur Definition von lokalen Koordinatensystemen und für Kontrollmechanismen, die eine Zuordnung von Objekten realisieren.

2.1 2D-Separierung von Punkt-Clustern

Die Separierung von Punkt-Clustern ist eine automatische Suche und Trennung von zusammengehörigen Laserscannerpunkten. Ein Patch ist im Folgenden ein definiertes Strukturelement, über das eine Separierung des Datensatzes erfolgen soll. Das Patch dient in erster Linie einer Zuordnung von benachbarten Punkten. Es ist so definiert, dass es die gleiche Ausrichtung besitzt wie das Koordinatensystem. Mit der Größe des Patches wird die Entfernung angegeben, mit der zwei Objekte voneinander getrennt werden sollen. Anhand des Patches wird die gesamte Punktwolke durchsucht. Der Algorithmus startet bei einem beliebigen Punkt der Punktwolke, der als Mittelpunkt für das Suchpatch dient. Im

Folgenden werden alle Punkte des Datensatzes heraus gesucht, die innerhalb der definierten Fläche liegen.

Durch die Aufteilung des Patches in Quadranten können vier primäre Suchpunkte definiert werden. Wenn hingegen ein Quadrant keine Datenpunkte enthält, werden an benachbarten Quadranten, die Punkte enthalten, sekundäre Suchpunkte gesetzt. Es sind vier sekundäre Suchpunktpositionen möglich. Diese befinden sich am Schnittpunkt einer Quadrantenabgrenzung und einer Außenkante des Patches. Die sekundären Suchpunkte sind für eine exakte Objekttrennung erforderlich. Alle gefundenen Datenpunkte innerhalb des Patches werden in einer Objektstruktur gespeichert und aus dem Originaldatensatz entfernt. Die zuvor ermittelten primären und sekundären Suchpunkte sind neue Mittelpunkte für die weitere Patchsuche. Der Algorithmus wird so lange wiederholt, bis alle Suchpunkte abgearbeitet sind und keine neuen Suchpunkte über ein Patch gesetzt werden können. Das Prinzip ist in Abbildung 4 verdeutlicht. Mit diesem Algorithmus ist es möglich, die Punktwolken der einzelnen Schnittprofile in einzelne Objekte zu zerlegen.

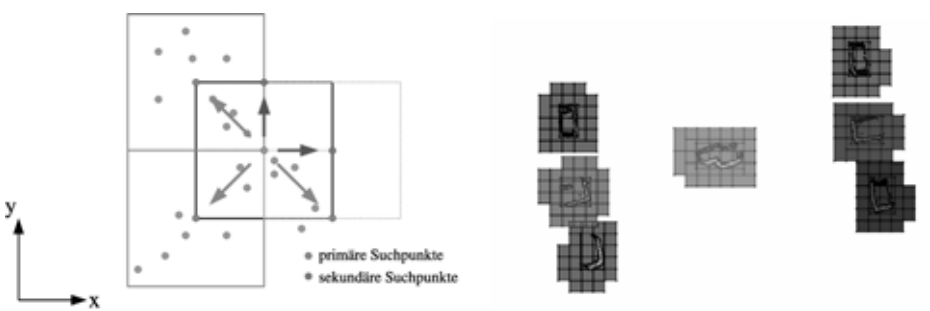


Abb. 4: Objektseparierung, dynamische Patchsuche durch Definition neuer Suchpunkte (links), Ergebnis der Objektseparierung (rechts)

2.2 3D-Separierung von Punkt-Clustern

Mit dem Ansatz der Objektsuche über eine dynamische Quadersuche wird der entwickelte zweidimensionale Algorithmus aus Kapitel 2.1 auf eine dreidimensionale Separierung von Punkt-Clustern erweitert. Das Verfahren soll benachbarte Punkte im Raum zu einem Objekt zusammenfassen.

Die Zusammenfassung beruht auf einer räumlichen Suche mit einem definierten Quader. Die Größe des Quaders ist im Vorfeld so festzulegen, dass die Seitenlängen mindestens halb so klein sind wie der Abstand zweier zu trennender Objekte. Durch diese Festlegungen definiert sich der Quader mit den Größen dx, dy und dz. Die Orientierung wird durch das Koordinatensystem festgelegt. Der Verfahrensablauf erfolgt analog zum zweidimensionalen Fall. Ein beliebiger Punkt aus der Punktwolke wird als Mittelpunkt des ersten Suchquaders festgelegt. Mithilfe der Abgrenzungen des Quaders werden alle Punkte gefiltert, die sich innerhalb des Quaders befinden. Diese Punkte werden nach dem Quadrantentest aus der Punktwolke gelöscht und in einer separaten Objektstruktur gespeichert. Die Aufteilung des Suchquaders in acht Quadranten ist in Abbildung 5 visualisiert.

Durch die Definition der acht Quadranten ist es möglich, die sekundären und primären Suchpositionen festzulegen, die als mögliche Mittelpunkte eines neuen Suchquaders dienen. Damit ist es möglich, räumlich getrennte Punkte verschiedenen Objekten zuzuweisen. Mit dem Ziel, ein Objekt vollständig aus der Punktwolke zu separieren, sind alle durch den Algorithmus entstanden Suchpositionen abzuarbeiten.

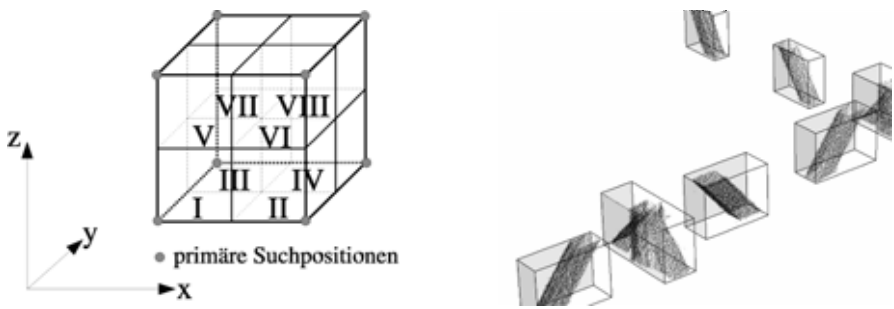


Abb. 5: Suchquader mit der Aufteilung in einzelne Quadranten (links), Ergebnis der Separierung von Punktclustern im dreidimensionalen Raum (rechts)

3 Extraktionen von Primitiven

3.1 Geradenextraktion in separierten Objekten

Im folgenden Kapitel wird eine Geometrieextraktion anhand eines zuvor erstellten zweidimensionalen Objekts näher erläutert. Theoretisch kann jede Kurve, Parabel, Gerade oder jeder Kreis als Modellierungsgrundlage dienen. Problematischer ist es, eine Näherungslösung (Lage und Orientierung) für eine Geometrie zu finden, wenn mehrere Geometrien in einem Objekt enthalten sind. Mit zunehmender Komplexität einer Geometrie nimmt der Aufwand zur Bestimmung einer Näherungslösung zu.

In der Regel besteht ein Dachstuhl aus einer Vielzahl an Balken, Sparren und Dachlatten. Die Oberflächen der einzelnen Bestandteile können durch approximierende Flächen oder durch kombinierte Regelkörper beschrieben werden. Diese Annahme kann annähernd für den gesamten Datensatz Anwendung finden. Wird die Punktwolke horizontal geschnitten, so erhält man aufgrund der hauptsächlich vertikalen Richtung der Balken als Resultat einen Balkenquerschnitt, der durch einzelne Geraden darstellbar ist. Im speziellen Beispiel des Bautzener Doms besteht ein extrahiertes Objekt aus einer kleinen Punktwolke, die einen Teil des Dachstuhls beschreibt. Das kann im Einzelnen ein Balken, ein Teil einer Dachplanke oder des Dachstockes sein. Die Streuung (Genauigkeit des Laserscanners und Rauigkeit der Balkenoberfläche) der einzelnen Datenpunkte beträgt im dreidimensionalen Datensatz durchschnittlich ± 1 bis 2 cm.

Bei der Projektion in die Ebene (zweidimensionaler Ansatz) kann diese Streuung nur für Balken übernommen werden, die zur Schnittebene senkrecht stehen. Alle Balken, die eine andere Neigung aufweisen, werden im Schnitt mit einer geringeren Punktdichte und einer größeren Streuung der Datenpunkte abgebildet.

Der verwendete Grundalgorithmus für die Bestimmung der Näherungslösung einer Geraden ist eine Houghtransformation (HOUGH 1962). Hierbei werden kollineare Punkte in einem Bildausschnitt in einem Parameterraum gefunden. Als Grundlage dient die Hessesche Normalform der Geraden. Die Houghtransformation stellt ein sehr robustes Verfahren zur Bestimmung von Näherungslösungen für eine Gerade dar, auch für Punkte, die eine gewisse Streuung besitzen. Aufgrund dessen, dass das Verfahren aus der Bildverarbeitung stammt, sind sowohl der Ortsraum und als auch der Parameterraum durch eine Bildmatrix beschrieben (HABERÄCKER 1991). Jedes detektierte Maximum im berechneten Parameterraum wird in den Ortsraum zurücktransformiert, mit dem Ziel, eine Gerade in einer Punkt-Richtungsform zu erhalten. Mithilfe einer ausgleichenden Geraden kann anschließend die Näherungslösung der Houghtransformation verbessert werden (Abb. 6).

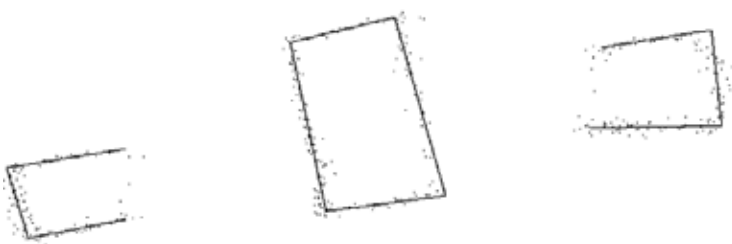


Abb. 6: Geradenextraktion von drei einzelnen Balken in einem zweidimensionalen Schnittprofil (minimale Punktanzahl für eine Geradendetektion sind 10 Datenpunkte)

3.2 Extraktion von Ebenen in separierten Objekten

Der zweidimensionale Ansatz liefert für annähernd senkrecht stehende Balken gute Ergebnisse, zur Schnittebene geneigte Balken (> 45°) können hingegen nur schlecht bis gar nicht detektiert werden. Durch diese Einschränkung ist es nicht möglich, alle Balkenpositionen für eine Topologiefindung in dem jeweiligem Schnittprofil zu bestimmen. Zur Lösung dieser Problematik wurde ein dreidimensionaler Ansatz zur Separierung der Begrenzungsflächen der Balken des Dachstuhls realisiert.

Die Extraktion soll ohne Einschränkungen im dreidimensionalen Raum und ohne Vorinformationen erfolgen. Mit diesen Bedingungen wurde die zweidimensionale Houghtransformation für Geraden so erweitert, dass sie für eine Ebene anwendbar ist (VOSSELMAN et al. 2004). Ausgangspunkt für die Berechnung ist die Hessesche Normalform der Ebene, was bedeutet, dass für jeden Punkt eine Ebenenschar zu generieren und in einen Parameterraum einzutragen ist. Über diesen Parameterraum ist es möglich, eine Aussage zu treffen, an welchen Stellen und mit welcher Orientierung sich Ebenen im Raum befinden. Diese Ebenenparameter dienen analog dem zweidimensionalen Fall (Gerade) als Näherung für eine Ebenenausgleichung (KERN 2003). Alle extrahierten Ebenen wurden im Anschluss miteinander verschnitten (Abb. 7).

Abb. 7: Ebenenextraktion, visualisiert durch die Schnittgeraden der detektierten Ebenen

4 Rekonstruktion der Dachstuhltopologie

Mit dem vorgestellten Verfahrensablauf ist es möglich, aus den Extraktionsergebnissen eine Balkentopologie auf Grundlage von geometrischen Schwerpunkten zu berechnen. Mit dem Ziel, eine Visualisierung der Topologie des Bautzener Doms zu erhalten, wurden die Ergebnisse der Geometrieextraktion in ein CAD-Programm importiert. In diesem Programm wurden die Stäbe über die einzelnen geometrischen Schwerpunkte der einzelnen extrahierten Geometrien erstellt (Abb. 8). Dieser Arbeitsschritt erfolgt im derzeitigen Bearbeitungsstand noch interaktiv.

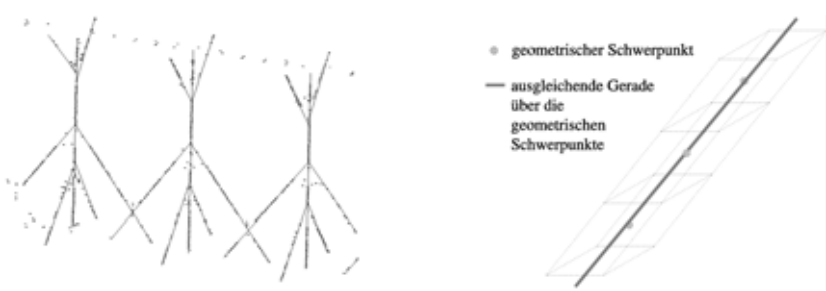


Abb. 8: Ausschnitt des Extraktionsergebnisses vom Dachstuhl Bautzener Dom: durch mehrere geometrische Schwerpunkte konstruierte Stäbe (visualisiert mit AutoCAD) (links), Verbindung der einzelnen geometrischen Schwerpunkten in einem Schnittprofil (rechts)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Verfahren zur Detektion und Modellierung der Begrenzungsflächen von Dachbalken mit dem Ziel der Tragwerksmodellierung entwickelt. Das Verfahren beruht auf der Unterteilung einer Laserscannerpunktwolke in Schichten und der

Suche nach Begrenzungslinien in 2D-Projektionen bzw. nach Begrenzungsflächen durch eine Houghtransformation.

Die Ergebnisse sind stark von der Punktdichte und der Streuung der Punkte in den Schnittebenen abhängig. Etwa 75 % aller extrahierten Daten konnte für eine Weiterverarbeitung verwendet werden. Hierauf basierend konnte manuell ein Stabwerkmodell für die Statikberechnung mit einer Genauigkeit von 1−2 cm erstellt werden.

Für die Zukunft ist eine automatische Zuordnung der einzelnen geometrischen Schwerpunkte zu einer Balkentopologie vorgesehen. Mit diesem Verfahrensschritt ist es dann möglich, aus einer Laserscannerpunktwolke automatisch ein Stabwerksmodell zu extrahieren, mit dem eine Statikberechnung des kompletten Dachstuhls erfolgen kann.

Literatur

Haberäcker, P. (1991). *Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendung*. Carl Hansen Verlag, München, Wien

Henze, F.; Wulf-Rheidt, U.; Bienert, A. & D. Schneider (2005): *Photogrammetric and geodetic documentation methods at St. Petri Cathedral, Bautzen*. Turin (Italy). CIPA Archives for Documentation of Cultural Heritage, Volume XX-2005 & ISPRS International Archives, Volume XXXVI-5/C34

Hough, P. V. C. (1962) *Method and means for recognizing complex patterns*. U. S. Patent 3,069,654

Kern, F., (2003) *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. In: Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig Heft Nr. 19

Rabbani, T. & F. van den Heuvel (2005): *Efficient Hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds*, Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, Volume XXXVI, Part 3/W19

Vosselman, G.; Gorte, B.; Sithole, G. & T. Rabbani (2004) *Recognising structure in laser scanner point clouds*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 46 (part 8/W2). 33-38

Laserscanning

Genauigkeitsuntersuchungen

Genauigkeitsüberprüfung terrestrischer Laserscanner mittels Referenzkörper

Miriam ZÁMEČNÍKOVÁ und Thomas WEBER

Zusammenfassung

Der Beitrag befasst sich mit der Überprüfung des terrestrischen Laserscanners (TLS) HDS2500 aus dem Blick der Genauigkeitsuntersuchung erhaltener, modellierter Geometrien eines gescannten Objektes. Die Überprüfung basiert auf dem Scannen von Referenzkörpern (RK) mit bekannter Geometrie und bekannten geometrischen Beziehungen. Die RK stellen Etalone dar, gegenüber denen die geometrischen Charakteristiken der aus Punktwolken des TLS gebildeten Modelle verglichen werden, wie z. B. Abweichungen der gemessenen Punkte von einer Ebene oder der zylindrischen Oberfläche, Dimensionen (Maßstab), gegenseitige Winkel zwischen Ebenen und Achsensymmetrie der Zylinder. Ziel der Testmessungen ist, die Geometrie von den Modellen der RK in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Referenzkörper und des TLS zu untersuchen. Ebenso soll diese in Abhängigkeit von der veränderlichen räumlichen Lage der RK gegenüber der TLS-Position bestimmen werden. Mit dem Scannen der RK in verschiedenen Positionen des Gesichtsfeldes wird die homogene Einstellung der Parameter des TLS im ganzen Messbereich beobachtet. Die räumliche Lage der modellierten Punkte von den Referenzkörpern wurde mit einer unabhängigen, genügend genauen geodätischen Methode überprüft (Vorwärtseinschneiden mit TPS). Das Ergebnis der Untersuchung sind die Abweichungen von nominalen geometrischen Parametern, die die Informationen über Qualität des mit der Laserscanning-Technologie gebildeten Modells bieten.

1 Einführung

Bis zu diesem Zeitpunkt hat sich kein Verfahren bzw. Versuchsanordnung zur Überprüfung eines TLS etabliert, um den Benutzern objektive Informationen über die jeweilige Genauigkeit anzubieten, die ihre Laserscanner bei der Erfassung realer Objekte leisten. Gleichzeitig ist es evident, dass die Fachpraxis an die Notwendigkeit einer ausführlicheren Information über die Qualität der mit der Laserscanning-Technologie gebildeten Modelle appelliert. Gerade dieser Umstand regte den Impuls zur Ausarbeitung eines Konzeptes an, welches die Genauigkeit von TLS mittels realer Objekte überprüfen soll. Die ausgeführten Tests tragen zur Bildung eines universalen Verfahrens der Lasescannerüberprüfung bei.

2 Motivation zur Überprüfung

Bei den Testvorschlägen gingen wir von der realen Welt aus. Die mit dem TLS gescannte Szene repräsentieren Objekte, die sich in den verschiedenen räumlichen Positionen und in verschiedenen Entfernungen des TLS befinden und aus verschiedenen Gesichtsfeldern des TLS gescannt werden. Die Überprüfung simuliert eine solche reale Szenerie, die durch die Testobjekte gebildet wird.

3 Referenzkörper

Die Überprüfung basiert auf dem Scannen von Testobjekten mit bekannter Geometrie und bekannteN geometrischen Beziehungen. Die Testobjekte der gescannten Szenerie repräsentieren die Referenzkörper (RK), (ZÁMEČNÍKOVÁ 2006). Sie sind Etalone (Prüfmaßstäbe), gegenüber denen die geometrischen Eigenschaften der aus Punktwolken des TLS gebildeten Modelle verglichen werden. Davon abgeleitete Untersuchungsgrößen sind: Abweichungen der gemessenen Punkte von der Sollgeometrie, Dimensionen der RK, gegenseitige Winkelüberprüfung zwischen Ebenen, Achsensymmetrie der Zylinder usw.

Das Testverfahren wird mittels zweier RK realisiert. Der erste Referenzkörper besteht aus zwei Quadern, einen kleineren und einen größeren, die aufeinander zentrisch fixiert sind. Der zweite Referenzkörper setzt sich zusammen aus einem Zylinder mit kleinerem Durchmesser, der zentrisch auf einem Zylinder mit größerem Durchmesser angebracht ist.

Die Maße für die Referenzquader (RQ) betrugen 450 × 450 × 250 mm bzw. 150 × 150 × 250 mm. Die Referenzzylinder (RZ) haben Durchmesser von 400 mm bzw. 180 mm bei einer Höhe von je 250 mm.

Die RK sind aus einem glatten Material – Glastextit – gefertigt. Das Material entspricht den Anforderungen mechanischer Beanspruchung sowie der Wärmewiderstandsfähigkeit. Die Körper sind mit matter, grauer Farbe überzogen.

Die Anfertigungsgenauigkeit wurde auf der Basis der von dem Hersteller angegebenen Genauigkeit für modellierte Flächen (im Fall des HDS 2500 beträgt sie 2 mm) bestimmt. Da die Referenzkörper Etalone repräsentieren, hätten sie ordnungsgenauer gefertigt werden müssen (0,5 mm), vor allem, was die Ebenheit und Formgenauigkeit der Objekte betrifft.

Die Kontrolle der gefertigten Referenzkörper aus dem dimensionalen und flächenhaften Gesichtspunkt wurde mit der photogrammetrischen Methode durchgeführt. Die Koordinaten der photogrammetrisch bestimmten Punkte auf den Flächen der RQ erreichen den Mittelwert der Standardabweichung von 0,03 mm, auf den Flächen der RZ 0,06 mm. In der Software Cyclone (Version 5.3) wurde das räumliche Modell der RK aus den photogrammetrisch bestimmten Punkten generiert. Die photogrammetrisch bestimmten Punkte weisen die Residuen gegenüber den ausgeglichenen Flächen der RK auf. Die Standardabweichungen der Residuen σ_{res} erreichen die Werte von bis zu 0,05 mm, was beweist, dass die Flächen der RK genügend genau gefertigt wurden. Mit der photogrammetrischen Methode beurteilten wir nicht nur die Genauigkeit der Anfertigung der RK, sondern es wurden auch die nominalen Parameter (Sollwerte) der Sollkörper gewonnen, welche aus der Menge ausreichend genauer Punkte bestimmt wurden. Die geometrischen Parameter des aus photogrammetrisch bestimmten Punkten verfassten Modells präsentieren uns die vorgegebenen Eigenschaften der RK. Zu diesen Werten werden die geometrischen Parameter des durch Laserscanning bestimmten Modells verglichen.

Zur Haltung des Körpers über dem Boden und zur Simulation der verschiedenen Lagen der RK diente ein spezielles Stativ. Dieses ermöglicht drei räumlichen Drehungen des RK über Rotation um die Stehachse des Stativs selbst (die Rotation, die Drehung), Neigungseinstellung (die Neigung) und Rotation um die Hauptachse des Referenzkörpers (die Rotation). Die räumlichen Positionen der RK sind mittels drei Winkelmesser definiert. Die Standardabweichung der Winkeleinstellung der Position des RKs im Raum beträgt 2°.

4 Der überprüfte TLS

Die TLS-Tests wurden mit dem „camera-view“ TLS HDS2500 des Lehrstuhls für Geodäsie der TU München im Rahmen einer Kooperation durchgeführt. Der TLS der Firma Leica Geosystems hat laut Herstellerangaben eine Einzelpunktgenauigkeit von 6 mm in der Entfernungsmessung bei einer Reichweite bis 50 m und eine angegebene Genauigkeit für modellierte Fläche von 2 mm (LEICA GEOSYSTEMS 2005). Alle Testmessungen wurden im Labor des Lehrstuhls für Geodäsie der Slowakischen TU in Bratislava durchgeführt.

5 Testmessungen

Zur Erfassung der Eigenschaften der mit dem TLS gescannten Szenerie wurden folgende Versuchsanordnungen entworfen und realisiert:

- die RK wurden gemessen in verschiedenen räumlichen Lagen – sog. POSITIONEN,
- die RK wurden gemessen in verschiedenen Entfernungen von dem TLS – sog. ENTFERNUNGEN,
- die RK wurden gemessen in verschiedenen Teilen des Gesichtsfeldes – sog. HOMOGENITÄT,
- die aus Messungen mit dem TLS bestimmten und gemessenen mit tachymetrisch modellierten Punkten und Passpunkten – sog. MODELLIERTE PUNKTE.

Das Ziel der Testmessungen ist die Bestimmung des Einflusses der veränderlichen Lage und Entfernung des gescannten Objektes vom TLS. Mit dem Scannen der RK durch verschiedene Teile des Scanner-Gesichtsfeldes wird die homogene (unveränderliche) Einstellung der TLS-Parameter im ganzen Messumfang beobachtet. Die räumliche Lage der modellierten Punkte wird mit einer unabhängigen, genügend genauen, geodätischen Methode überprüft.

Die RK bei einzelnen Versuchsanordnungen werden durch das Scannen von einem TLS-Standpunkt erfasst. Die Testmessungen werden unter Laborbedingungen mit der Elimination möglicher Spiegelungen von benachbarten Objekten realisiert. Bei den Messungen mit dem TLS waren die Fenstervorhänge zugezogen und es wurde die künstliche Beleuchtung benutzt, womit identische Bedingungen während des ganzen Scanprozesses gewährleistet wurden. Hinter den Referenzkörpern hing in Messrichtung ein schwarzer Vorhang.

Das Scannen verlief bei der Versuchsanordnung POSITIONEN mit der Scandichte von 2,4 mm und bei den Versuchsanordnungen ENTFERNUNG und HOMOGENITÄT mit der Scandichte von 1,2 mm.

5.1 Versuchsanordnung POSITIONEN

Mittels des oben beschriebenen Stativs wurden die verschiedenen räumlichen Lagen der RK mit der Drehung, Neigung und Rotation simuliert. Alle Positionen der RK wurden aus der Entfernung 10 m gescannt. Die RQ wurden in der horizontalen Richtung von 0° bis 90° je 15° gedreht, von 0° bis 90° je 15° geneigt und um die Körperachse um 0°, 15°, 45° rotiert. Bei den RZ wurde die Drehung von 0° bis 90° mit Schritt 15° und die Neigung von 0° bis 90° mit Schritt 15° simuliert. Die Indizis mit den Fotos der eingestellten räumlichen

Positionen der RK sind in der Dissertation ZÁMEČNÍKOVÁ (2006) angeführt. Mit dem TLS wurden 147 Positionen gescannt und 49 Positionen der RZ.

5.2 Versuchsanordnung ENTFERNUNGEN

Das Prinzip der Messungen beruht auf dem Scannen der RK in verschiedenen Entfernungen im Rahmen der TLS-Reichweite. Mit dem TLS wurden 2 Positionen der RQ und 2 Positionen der RZ gescannt. Die RQ wurden in den Entfernungen von 10 m bis 60 m gemessen und die RZ von 10 m bis 50 m mit einer Schrittweite von 10 m.

5.3 Versuchsanordnung HOMOGENITÄT

Mit der Drehung des Scankopfes wurden die RK in neun verschiedene Teile des Gesichtsfeldes eingestellt. Das Ergebnis dieses Messtyps ist das aufgenommene Objekt in einer räumlichen Lage bei einer bestimmten Entfernung, aber durch einen anderen Teil des Gesichtsfeldes. Bei diesem Messtyp wurden aufgenommen 2 Positionen der RQ und 2 Positionen der RZ in der Entfernung 10 m von TLS.

5.4 Versuchsanordnung MODELLIERTE PUNKTE

Parallel zum Laserscanning wurden geodätische Messungen mit einem Tachymeter bei den Messtypen ENTFERNUNGEN und HOMOGENITÄT durchgeführt. Diese wurden mit dem Ziel kontrolliert, die räumliche Lage der modellierten Punkte der RQ zu überprüfen, welche über Durchdringungen der Flächen gewonnen werden. Bei dieser Versuchsanordnung in der Umgebung der RQ waren vier Passpunkte in verschiedenen Niveaus und in der Tiefausrückung gegenüber den RQ situiert. Die Passpunkte stellten plane Reflexziele von der Firma Leica Geosystems vor. Die geodätischen Messungen wurden mit einem TCA 1101, der mit der Standardabweichung für einen gemessenen Winkel von 5° und der Standardabweichung zur Distanzmessung auf einen Reflektor mit 2 mm + 2 ppm angegeben ist, realisiert. Die Methode des räumlichen Vorwärtseinschneidens über Winkel wurde zur Festlegung der räumlichen Lage der vier Passpunkte und der Eckpunkte der Quader ausgenützt.

6 Bearbeitung der gemessenen Daten

Aus den Versuchsanordnungen POSITONEN, ENTFERNUNGEN, HOMOGENITÄT gewannen wir die Punktwolke der RK. Das Bearbeitungsverfahren kann in diesen sechs Schritten verteilt werden:

1. Die Bildung der RK-Modelle. Die Methodik der Modellbildung stimmt mit der Bildung der nominalen Modelle aus photogrammetrisch bestimmten Punkten überein, damit es möglich ist, die geometrischen Parameter der RK zu vergleichen.
2. Die Messung der geometrischen Charakteristiken der RK-Modelle im Modellraum des Programmes Cyclone 5.3
3. Die Archivierung und die Ordnung der gemessenen geometrischen Parameter
4. Der Vergleich der nominalen und gemessenen geometrischen Parameter, die Ausrechnung ihrer Differenzen

5. Die grafische Darstellung der untersuchten Abhängigkeit, d. h. der Abweichungen von den nominalen Parametern und der veränderlichen räumlichen Lage, der veränderlichen Entfernung der RK von dem TLS, den verschiedenen Teilen des Gesichtsfeldes. Die Auswertung der Ergebnisse der einzelnen Messtypen aufgrund der Größe der Abweichungen von den nominalen geometrischen Charakteristiken und ihres Verlaufes

Die Bearbeitung der Versuchsanordnung MODELLIERTE PUNKTE besteht aus diesen Leistungen:

- Die Berechnung der Koordinaten der Passpunkte und der Ecken der RQ aus dem räumlichen Vorwärtseinschneiden über Winkel im lokalen Koordinatensystem (LKS), definiert durch die Tachymeter
- Die Rechnung der Transformationsparameter zwischen dem LKS des TLS und dem LKS des Tachymeters mittels der Passpunkte mit der Erwägung des Einflusses der Genauigkeiten der beiden Koordinatensystemen
- Helmerttransformation der modellierten Punkte, die durch die Durchdringung der modellierten Flächen entstanden, aus dem Scannerkoordinatensystem in das LKS des Tachymeters
- Der Vergleich der räumlichen Lage der modellierten Punkte, die mit TLS und TPS bestimmt wurden
- Die Genauigkeitsanalyse
- Die Auswertung der Ergebnisse, die Gewinnung der Informationen über die möglichen Änderungen der räumlichen Lager der modellierten Punkte

7 Auswertung der Überprüfung von TLS

Aus dem Vergleich der nominalen, geometrischen Eigenschaften und aus gemessenen Werten des Modells wurden ihre Differenzen oder Abweichungen berechnet und dargestellt. Aufgrund der Abweichungen gewinnen wir Erkenntnisse über die Qualität des mit der Laserscanning-Technologie gebildeten Modells.

7.1 Die Auswertung der Versuchsanordnung POSITIONEN

Die RK-Modelle gewannen wir durch die aus der zugehörigen Punktwolke berechneten, ausgeglichenen Ebenen. Die Messpunkte weisen die Residuen gegenüber der ausgeglichenen Fläche auf und sind mit einer Standardabweichung der Residuen σ_{res} charakterisiert. Die Residuen σ_{res} geben Auskunft über die Streuung der mit dem TLS gemessenen Punkte. Durch die Auswertung der Positionen der RQ und der RZ gelangten wir zu Folgendem:

Je größer der Einfallswinkel des Laserstrahlenbündels auf die gegebene Fläche ist, desto kleiner ist die Punkteanzahl auf ihr, und σ_{res} erreichen deshalb kleinere Werte. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich, dass bei größerem Auffallswinkel des Laserstrahlenbündels auf die Fläche eine kleinere Streuung der Messungen des TLS gegenüber der ausgeglichenen Fläche vorhanden ist.

Die Werte σ_{res} der ausgeglichenen Flächen, auf die das Laserstrahlenbündel unter demselben Eintreffswinkel (dieselbe Orientierung der Flächen im Raum) einfällt, differieren im Zehntel oder Hunderstel mm-Bereich.

Die erste untersuchte Dimension ist die Länge zwischen den Ecken der RQ. Die Länge ist von zwei Punkten der RQ bestimmt, die als Schnittpunkte der drei ausgeglichenen Flächen entstanden sind. Anhand der logischen Erwägung und der grafischen Darstellung der Abweichungen von nominalen Längen zwischen den Ecken ergibt sich, dass die Abweichungen am kleinsten sind, wenn die auf dem modellierten Schnittpunkt beteiligten Flächen mit demselben Maß durch den TLS gescannt wurden. Die Erkenntnis gilt bei 95 % der ausgewerteten Längen.

Die zweite untersuchte Dimension stellen die Durchmesser der RZ dar. Durch die Analyse der grafischen Darstellung der Abweichungen von den nominalen Durchmessern stellten wir fest, dass, je größer der Einfallswinkel des Laserstrahlenbündels auf den Zylindermantel ist, desto kleiner sind die Abweichungen vom nominalen Durchmesser. Diese Behauptung zählt bei 80 % der untersuchten Durchmesser.

Die dritte beobachtete Dimension ist die Höhe des kleineren Zylinders der RZ. Aus den Modellen der RZ stellten wir fest, dass, je größer der Einfallswinkel des Laserstrahlenbündels auf die Zylindergrundflächen ist, desto kleiner sind die Abweichungen von der nominalen Höhe. Diese Abhängigkeit behauptete sich in 83 % der Messungen.

Die Ebenen des kleineren und größeren Quaders der RQ so wie auch die Grundflächen der RZ sind parallel. Die Abweichungen von der Parallelität weisen keine eindeutige Abhängigkeit bei allen eingestellten Positionen der RK aus.

Für die Achsensymmetrie der beiden Zylinder erhält man eine Abweichungen von –3,2´ bis 10,2´, außer den Positionen, wenn das Laserstrahlenbündel unter sehr großem Einfallswinkel auf die zylindrische Fläche einfällt, in diesem Fall erreichen die Abweichungen Werte bis zum 36,5´.

Die Graphen deuten auf die größeren Abweichungen von den nominalen rechten Winkeln bei den kleinen Flächen auf. Der Einfluss der Ebenengröße auf die Abweichungswerte von dem nominalen Winkel zeigte sich bei den Winkelkombinationen mit der kleinsten RQ-Fläche – der Obergrundfläche des kleinen Quaders. 86 % der Abweichungen von den nominalen Winkeln erreichen die Werte von –10´ bis 10´, die übrigen 14 % wachsen noch an. Aus 14 % der Abweichungen größer als 10´, also mehr als die Hälfte (57 %), bilden die Abweichungen von den Winkelkombination mit der kleinsten Fläche. Die numerische Auswertung der Abweichungen im Rahmen aller eingestellten Positionen der RQ und der RZ enthalten Tabelle 1 und Tabelle 2.

Selbstverständlich wurden die Abweichungen von den nominalen Parametern für die einzelnen Flächen ausgewertet, für die einzelnen Längen usw. Wir führen die Intervalle der minimalen bzw. maximalen Werte und Mittelwert der Abweichung von dem nominalen Parameter ein. Zum Beispiel das Interval der minimalen Wert σ_{res} umfasst die minimalen Werte von allen Flächen usw.

Tabelle 1: Die ausgewerteten Abweichungen von den nominalen Parametern der Referenzquader bei der Versuchsanordnung POSITIONEN

Abweichungen von Nominalwerten der geometr. Parameter	Ausgewertete Abweichungen			
	min Δ	max Δ	Mittelwert Δ	max Δ – min Δ
ausgeglich. Ebenen [mm]	0,27 – 0,83	0,42 – 3,70	0,39 – 1,97	0,06 – 3,31
Längen [mm]	(–3,30) – 0,19	(–0,17) – 1,57	(–0,62) – 0,22	0,78 – 2,94
Paralität [´]	(–36,7) – (–6,5)	(–7,6) – 7,8	(–13,8) – (–1,2)	12,6 – 38,3
rechte Winkel [´]	(–41,1) – 16,5	(–2,3) – 50,2	(–15,6) – 23,8	1,9 – 58,9

Tabelle 2: Die ausgewerteten Abweichungen von den nominalen Parametern der Referenzzylinder bei der Versuchsanordnung POSITIONEN

Abweichungen von Nominalwerten der geometr. Parameter	Ausgewertete Abweichungen			
	min Δ	max Δ	Mittelwert Δ	max Δ – min Δ
ausgeglich. Zylinder[mm]	0,53 – 0,70	2,88 – 2,96	2,16 – 2,21	2,26 – 2,35
ausgleich. Ebenen [mm]	0,28 – 0,33	2,81 – 2,88	1,41 – 1,52	2,53 – 2,55
Durchmesser [mm]	(–0,17) – 1,64	6,66 – 6,86	4,09 – 4,24	5,02 – 7,03
Höhe [mm]	0,11	0,69	0,42	0,58
Paralität [´]	–9,6	0,4	–3,1	10,0
Achsensymmetrie [´]	–3,2	33,3	5,0	36,5

7.2 Die Auswertung der Versuchsanordnung ENTFERNUNGEN

Bei der Auswertung dieser Versuchsanordnung betrachten wir die Erhaltung der geometrischen Parameter des Modells aus dem TLS in Abhängigkeit von der Entfernung. Daraus ergibt sich, dass besonders die Größenordnung der Änderung des geometrischen Parameters beobachtet wird. Tabelle 3 und 4 enthalten die Bereiche, in welchen die Werte der einzelnen geometrischen Charakteristiken mit der Entfernung schwanken.

Die grafische Darstellungen der Abweichungen von den nominalen Werten in Abhängigkeit der Entfernung der RK und des TLS haben einen schwankten Verlauf. Bei manchen Abweichungen zeigten sich die größeren Werte der Abweichungen bei größeren Entfernungen und außerhalb der empfohlenen Reichweite des angegebenen TLS.

Tabelle 3: Die ausgewerteten Abweichungen von den nominalen Parametern der Referenzquader bei der Versuchsanordnung ENTFERNUNGEN

Abweichungen von Nominalwerten der geometr. Parameter	Ausgewertete Abweichungen			
	min Δ	max Δ	Mittelwert Δ	max Δ – min Δ
ausgeglich. Ebenen [mm]	0,61 – 2,31	0,90 – 2,99	0,79 – 2,69	0,30 – 1,31
Längen [mm]	(–3,14) – 0,17	(–0,34) – 1,68	(–1,30) – 0,45	0,73 – 2,80
Paralität [´]	(–40,5) – (–10,5)	(–5,8) – 4,4	(–13,0) – (–2,4)	13,4 – 42,8
rechte Winkel [´]	(–43,0) – 1,3	(–6,0) – 49,4	(–12,5) – 6,4	5,9 – 68,6

Tabelle 4: Die ausgewerteten Abweichungen von den nominalen Parametern der Referenzzylinder bei der Versuchsanordnung ENTFERNUNGEN

Abweichungen von Nominalwerten der geometr. Parameter	Ausgewertete Abweichungen			
	min Δ	max Δ	Mittelwert Δ	max Δ – min Δ
ausgeglich. Zylinder[mm]	1,54 – 1,93	1,92 – 2,23	1,74 – 2,04	0,30 – 0,40
ausgleich. Ebenen [mm]	1,32 – 2,00	1,60 – 2,34	1,43 – 2,13	0,28 – 0,35
Durchmesser [mm]	0,44 – 1,05	2,77 – 6,80	2,00 – 3,48	2,33 – 6,21
Höhe [mm]	0,29 – 0,59	0,73 – 0,91	0,47 – 0,75	0,32 – 0,45
Paralität [´]	(–11,2) – (–9,3)	(–1,6) – 0,2	(–5,2) – (–5,1)	7,7 – 11,4
Achsensymmetrie [´]	(–1,3) – (–0,4)	3,5 – 9,8	1,3 – 3,6	3,8 – 11,2

7.3 Die Auswertung des Messtyps HOMOGENITÄT

Das Ziel dieser Versuchsanordnung war die Nachprüfung, ob die Verteilung der Abweichungen von den nominalen geometrischen Parametern im gesamten Gesichtsfeld homogen ist. Aus den grafischen Darstellungen der Abhängigkeit des Gesichtsfeldausschnitts und der Abweichungen von den nominalen Parametern zeigte sich kein systematischer Einfluss auf die Verzerrung des jeweiligen Ausschnitts des Gesichtsfelds. Die größte Schwankung weist die Abweichung von den nominalen Durchmessern aus. Die größte Differenz (max Δ – min Δ) von den nominalen Dimensionen erreicht 1,55 mm und die maximale Differenz (max Δ – min Δ) von den vorgegebenen Winkeln 14,6´, was in der Entfernung 0,45 m (die größte Dimension der Ebenen) eine Längenabweichung von 1,90 mm bedeutet.

7.4 Die Auswertung des Messtyps MODELLIERTE PUNKTE

Sie beruhte auf den Vergleich der Punktkoordinaten der RQ, die durch die Modellierung und die geodätischen Messungen festgestellt wurden. Aus den ausgerechneten Koordinatendifferenzen ΔX, ΔY, ΔZ und ihren Standardabweichungen $\sigma_{\Delta X}$, $\sigma_{\Delta Y}$, $\sigma_{\Delta Z}$ kann man eine Folgerung aussprechen, dass die Veränderungen der räumlichen Lage der modellierten Punkte sind nicht nachweisbar $|\Delta X| < \sigma_{\Delta X}$, $|\Delta Y| < \sigma_{\Delta Y}$, $|\Delta Z| < \sigma_{\Delta Z}$.

8 Abschluss

Die realisierten Testmessungen tragen zu einem neuen Verfahren im Bereich der Überprüfung von Laserscannern bei. Sie sind ein Bestandteil eines neuen Verfahrens für Laserscannerüberprüfung mittels Referenzkörper, die an der Slowakischen TU in Bratislava entwickelt wird. Die Aufforderung in Zukunft ist die Realisierung der Tests mit Referenzkörpern anderer Geometrie und unter natürlicheren Bedingungen. Ebenso ist die Erweiterung der Untersuchungen für andere Scannertypen angedacht.

Literatur

Leica Geosystems (2005): *Spezifikationen des Laserscanners HDS2500*. www.leica-geosystems.com/hds

Zámečníková, M. (2006): *Genauigkeitsüberprüfung terrestrischer Laserscanner*. Dissertation. Lehrstuhl für Geodäsie, Fakultät für Bauwesen, STU in Bratislava

Gemeinsame Bestimmung von Ziel-, Kippachsenfehler und Exzentrizität der Zielachse am Beispiel des Laserscanners Zoller + Fröhlich Imager 5003

Frank NEITZEL

Zusammenfassung

Es wird gezeigt, wie sich Ziel-, Kippachsenfehler und Exzentrizität der Zielachse für ein polares Messsystem, mit dem eine Messung in zwei Lagen möglich ist, gemeinsam aus einer überbestimmten Konfiguration mithilfe einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten bestimmen lassen. Die Veranschaulichung der Achsenfehler und die Anwendung der neuen Formeln erfolgt am Beispiel des Laserscanners Zoller + Fröhlich Imager 5003.

1 Einführung

Ist ein polares Messsystem (z. B. Tachymeter, Laserscanner) mit Achsenfehlern und Achsexzentrizitäten behaftet, werden Richtungs- und Winkelmessungen um den Einfluss dieser Fehler verfälscht. Folgende Fehler werden in diesem Beitrag betrachtet:

- Kippachsenfehler i,
- Zielachsenfehler c,
- Exzentrizität der Zielachse e.

Es ist anzumerken, dass mit diesen drei Größen keine vollständige Beschreibung aller Fehlereinflüsse möglich ist, weitere Fehler sind z. B. in DEUMLICH & STAIGER (2002, S. 205 ff.) aufgeführt, man kann aber davon ausgehen, dass sich mit den Größen i, c und e der größte Anteil der auf die Richtungs- und Winkelmessungen wirkenden Fehlereinflüsse beschreiben lässt.

Bei Messungen mit einem Tachymeter können die Einflüsse der genannten Fehler während der Aufnahme eines Objektes durch die Beobachtung von Richtungen in zwei Fernrohrlagen eliminiert werden. Sollen die Messungen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur in einer Fernrohrlage ausgeführt werden, so sind die Achsenfehler und die Exzentrizität der Zielachse vor der Messung zu bestimmen und die Ablesungen am Gerät rechnerisch zu korrigieren.

Ist es mit einem Laserscanner möglich, ein Objekt in zwei Lagen des Sensorkopfes aufzumessen, so ist es dennoch nicht möglich, die Einflüsse der Achsenfehler und der Exzentrizität unter Verwendung der Punktwolken in Lage 1 und 2 zu eliminieren, da aufgrund der flächenhaften Aufmessung eine eindeutige Punktzuordnung nicht gegeben ist. Es besteht aber die Möglichkeit, die Fehler vor der Messung mit einer geeigneten Messanordnung zu bestimmen und dann die Ergebnisse aus einem Scanvorgang in einer Lage rechnerisch zu korrigieren. Für diese Strategie wird gezeigt, wie sich die Fehler aus einer überbestimmten Konfiguration mithilfe einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten bestimmen lassen.

2 Instrumentensystem und polares Messsystem

Da die gebräuchlichen Begriffe für die Achsen und Teilkreise eines polaren Messsystems an die Lotrichtung gebunden sind, werden diese nun, wie in STAHLBERG (1997), durch Begriffe ersetzt, die sich nur auf das Instrument selber beziehen (s. Abb. 1). Ein polares Messsystem wird als Realisierung eines lokalen Koordinatensystems (Instrumentensystem) angesehen, das beliebig orientiert sein kann. Da die Realisierung eines abstrakten Systems jedoch nie perfekt gelingen kann, erhält man aus der Messung mit einem polaren Messsystem zu einem Punkt P statt der gesuchten Größen λ und ϑ die Werte α und ζ (s. Abb. 1).

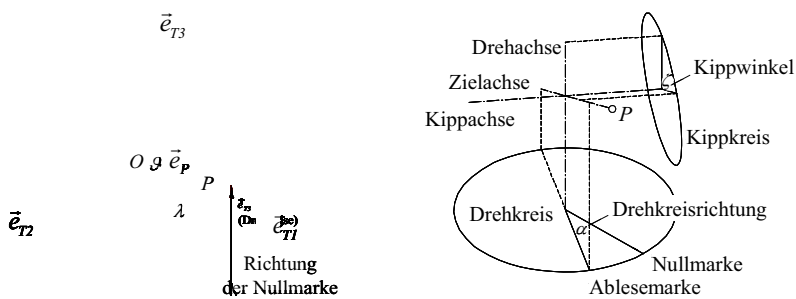


Abb. 1: Instrumentensystem (Modell) und polares Messsystem (Realisierung)

Aus einer Vielzahl mechanischer Unzulänglichkeiten bei der Realisierung des Instrumentensystems werden im Folgenden der Ziel- und der Kippachsenfehler und die Exzentrizität der Zielachse betrachtet, die allesamt die Richtungs- und Winkelmessung beeinflussen. Der Einfluss f, um den eine Drehkreisrichtung verfälscht wird und der zugehörige Kippwinkel ζ ergeben sich bei der Messung mit einem Tachymeter in beiden Fernrohrlagen aus

$$f = \frac{\alpha_{\mathrm{II}} - 200\,\mathrm{gon} - \alpha_{\mathrm{I}}}{2} \quad \text{und} \quad \zeta = \frac{\zeta_{\mathrm{I}} + 400\,\mathrm{gon} - \zeta_{\mathrm{II}}}{2} \quad , \tag{1}$$

wobei mit α_{I}, α_{II} und ζ_{I}, ζ_{II} die Messungen in Lage 1 und 2 bezeichnet sind.

3 Achsen und Achsenfehler

Die gemeinsame Bestimmung von Ziel-, Kippachsenfehler und Exzentrizität der Zielachse bei einem Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip wird anhand des Gerätes Zoller + Fröhlich Imager 5003 gezeigt. Bei Scannern mit tachymetrischem Messprinzip können die Achsbezeichnungen eines Tachymeters wie folgt verwendet werden:

- Drehachse: Achse, um die der Oberbau während eines Scanvorgangs rotiert
- Kippachse: Achse, um die der Umlenkspiegel während eines Scanvorgangs rotiert
- Zielachse: Unter Annahme einer kegelförmigen Ausbreitung des Messstrahls ergibt sich die Zielachse als Gerade von dem Punkt, an dem der Messstrahl in Richtung des Objektes ausgestrahlt wird (Punkt Z) zum Mittelpunkt der Grundfläche des Kegels (Punkt Z').

Eine Veranschaulichung der Instrumentenachsen zeigt Abbildung 2.

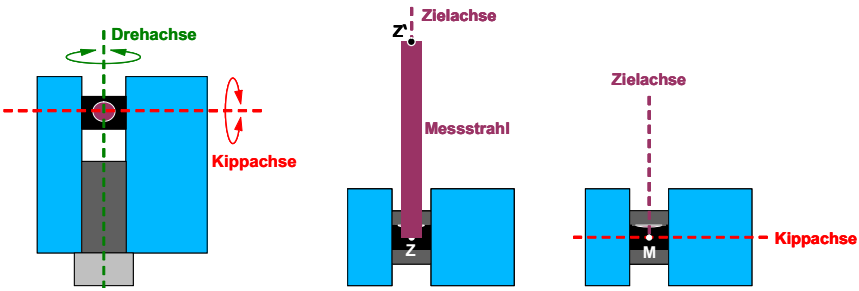


Abb. 2: Dreh-, Kipp- und Zielachse beim Zoller + Fröhlich Imager 5003

Bei einem fehlerfreien Instrument müssen folgende Achsbedingungen erfüllt sein:

- Kippachse senkrecht zur Drehachse
- Zielachse senkrecht zur Kippachse
- Zielachse verläuft durch den Teilungsmittelpunkt des Drehkreises.

Steht die Kippachse nicht senkrecht zur Drehachse, liegt ein Kippachsenfehler vor, steht die Zielachse nicht senkrecht auf der Kippachse, weist das Instrument einen Zielachsenfehler auf. Verläuft die Zielachse nicht durch den Teilungsmittelpunkt M des Drehkreises, liegt eine Exzentrizität der Zielachse vor. Diese Fehler lassen sich wie folgt definieren:

- Kippachsenfehler i: Winkel zwischen der Kippachse des Umlenkspiegels und der Normalen zur Drehachse, gemessen in der Ebene aufgespannt durch Dreh- und Kippachse
- Zielachsenfehler c: Winkel zwischen der Zielachse und der Normalen zur Kippachse, gemessen in der Ebene aufgespannt durch Kipp- und Zielachse
- Exzentrizität der Zielachse e: Radius des Kreises um den Teilungsmittelpunkt M des Drehkreises, den die Zielachse als Tangente bei Drehung des Oberbaus beschreibt

Eine Veranschaulichung der Achsenfehler und der Exzentrizität der Zielachse zeigt Abbildung 3.

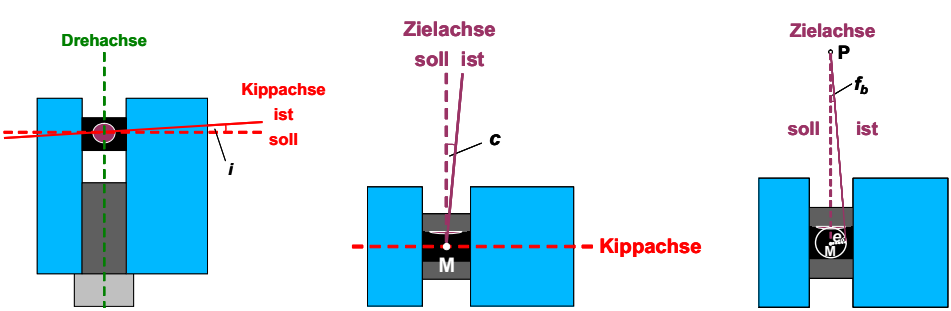


Abb. 3: Kippachsenfehler *i*, Zielachsenfehler *c*, Exzentrizität der Zielachse *e*

4 Bestimmung der Achsenfehler

Für die Verfälschung f_a der Drehkreisrichtungen, die abhängig ist von den Achsenfehlern c und i sowie vom Kippwinkel ζ, wird in STAHLBERG (1997)

$$f_a = \arctan\left(\frac{\cos i \tan c}{\sin \zeta} + \frac{\sin i}{\tan \zeta}\right) \tag{2}$$

angegeben. Die Verfälschung f_b (im Bogenmaß) der Drehkreisrichtungen aufgrund der Exzentrizität der Zielachse beträgt nach DEUMLICH & STAIGER (2002, S. 212)

$$f_b = \frac{e}{s} \quad , \tag{3}$$

wobei mit s die Strecke zum Zielpunkt bezeichnet ist. Fasst man die Fehlereinflüsse f_a und f_b zu einem Gesamteinfluss zusammen, erhält man

$$f = f_a + f_b = \arctan\left(\frac{\cos i \tan c}{\sin \zeta} + \frac{\sin i}{\tan \zeta}\right) + \frac{e}{s} \quad . \tag{4}$$

Da f und ζ aus Messungen in beiden Fernrohrlagen mit (1) bestimmt werden können, enthält die obige Gleichung drei Unbekannte, nämlich c, i und e. Zur Bestimmung dieser Unbekannten sind also mindestens drei solcher Gleichungen, also Messungen zu drei Punkten in beiden Fernrohrlagen, erforderlich. Werden mehr als drei Punkte verwendet, liegt eine überbestimmte Konfiguration vor und die Achsenfehler und die Exzentrizität können mithilfe einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten bestimmt werden.

4.1 Nichtlineares funktionales Modell

Aus den Ergebnissen der Messungen von Drehkreisrichtungen und Kippwinkeln zu $n > 3$ Zielpunkten in Lage 1 und 2 lassen sich ausgehend von (4) die nichtlinearen Gleichungen

$$\begin{aligned} f_1 &= \arctan\left(\frac{\cos i \tan c}{\sin \zeta_1} + \frac{\sin i}{\tan \zeta_1}\right) + \frac{e}{s_1} \\ &\vdots \\ f_n &= \arctan\left(\frac{\cos i \tan c}{\sin \zeta_n} + \frac{\sin i}{\tan \zeta_n}\right) + \frac{e}{s_n} \end{aligned} \tag{5}$$

aufstellen. Um die Unbekannten mithilfe einer vermittelnden Ausgleichung mit einer Beobachtung pro Beobachtungsgleichung zu lösen, werden die Kippwinkel plus ihre Verbesserungen und die Strecken plus ihre Verbesserungen als zusätzliche unbekannte Parameter angesehen, siehe KOCH (2000, S. 88 ff.), also

$$\begin{aligned} \hat{\zeta}_1 &= \zeta_1 + v_{\zeta_1} & \hat{s}_1 &= s_1 + v_{s_1} \\ \vdots \quad & \text{und} \quad & \vdots \quad & . \\ \hat{\zeta}_n &= \zeta_n + v_{\zeta_n} & \hat{s}_n &= s_n + v_{s_n} \end{aligned} \tag{6}$$

Sieht man die Definitionen (6) als zusätzliche Beobachtungsgleichungen an, erhält man die insgesamt 3*n* Beobachtungsgleichungen

$$\begin{matrix} f_1 + v_{f_1} = \arctan\left(\dfrac{\cos i \tan c}{\sin \hat{\zeta}_1} + \dfrac{\sin i}{\tan \hat{\zeta}_1}\right) + \dfrac{e}{\hat{s}_1} & \zeta_1 + v_{\zeta_1} = \hat{\zeta}_1 & s_1 + v_{s_1} = \hat{s}_1 \\ \vdots \qquad , & \vdots \quad \text{und} & \vdots \\ f_n + v_{f_n} = \arctan\left(\dfrac{\cos i \tan c}{\sin \hat{\zeta}_n} + \dfrac{\sin i}{\tan \hat{\zeta}_n}\right) + \dfrac{e}{\hat{s}_n} & \zeta_n + v_{\zeta_n} = \hat{\zeta}_n & s_n + v_{s_n} = \hat{s}_n \end{matrix} \tag{7}$$

zur Bestimmung der Unbekannten *i*, c und *e* sowie $\zeta_1, \ldots, \zeta_n$ und $s_1, \ldots, s_n$. Dieses nichtlineare Ausgleichungsproblem kann durch Linearisierung an der Stelle geeigneter Näherungswerte c^0, i^0 und e^0 sowie ζ_i^0, s_i^0 und iterative Berechnung gelöst werden. Fasst man die unbekannten Parameter zu den Vektoren

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} \Delta c & \Delta i & \Delta e \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \Delta\zeta_1 & \cdots & \Delta\zeta_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \text{ und } \mathbf{x}_3 = \begin{bmatrix} \Delta s_1 & \cdots & \Delta s_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

zusammen, lauten die Funktionalmatrizen für die ersten *n* Beobachtungsgleichungen

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_1}{\partial c} & \dfrac{\partial f_1}{\partial i} & \dfrac{\partial f_1}{\partial e} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dfrac{\partial f_n}{\partial c} & \dfrac{\partial f_n}{\partial i} & \dfrac{\partial f_n}{\partial e} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_1}{\partial \zeta_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_1}{\partial \zeta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dfrac{\partial f_n}{\partial \zeta_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_n}{\partial \zeta_n} \end{bmatrix} \text{ und } \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_1}{\partial s_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_1}{\partial s_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dfrac{\partial f_n}{\partial s_1} & \cdots & \dfrac{\partial f_n}{\partial s_n} \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Die verkürzten Beobachtungsvektoren ergeben sich zu

$$\mathbf{l}_1 = \begin{bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ f_i - \left\{ \arctan\left(\dfrac{\cos i^0 \tan c^0}{\sin \zeta_i^0} + \dfrac{\sin i^0}{\tan \zeta_i^0}\right) + \dfrac{e^0}{s_i^0} \right\} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l}_2 = \begin{bmatrix} \zeta_1 - \zeta_1^0 \\ \vdots \\ \zeta_n - \zeta_n^0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l}_3 = \begin{bmatrix} s_1 - s_1^0 \\ \vdots \\ s_n - s_n^0 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Mit den Gewichtsmatrizen $\mathbf{P}_1$, $\mathbf{P}_2$ und $\mathbf{P}_3$ der Beobachtungen f_i, ζ_i und s_i ergibt sich mit dem Varianzfaktor σ_0^2 das lineare Modell zu

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 + \mathbf{v}_{\mathrm{l}_1} \\ \mathbf{l}_2 + \mathbf{v}_{\mathrm{l}_2} \\ \mathbf{l}_3 + \mathbf{v}_{\mathrm{l}_3} \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad D\left(\begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \\ \mathbf{l}_3 \end{bmatrix} | \sigma_0^2\right) = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{P}_3^{-1} \end{bmatrix}, \tag{11}$$

wobei mit $\mathbf{E}$ die Einheitsmatrix der Dimension $(n \times n)$ bezeichnet ist. Die Schätzwerte für die Unbekannten erhält man aus den iterativ zu lösenden Normalgleichungen

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_3 \\ \mathbf{A}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_2 + \mathbf{P}_2 & \mathbf{A}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_3 \\ \mathbf{A}_3^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_3^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{A}_3 + \mathbf{P}_3 \end{bmatrix}}_{\mathbf{N}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{l}_1 \\ \mathbf{A}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{l}_1 + \mathbf{P}_2\mathbf{l}_2 \\ \mathbf{A}_3^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_1\mathbf{l}_1 + \mathbf{P}_3\mathbf{l}_3 \end{bmatrix} . \tag{12}$$

Die Standardabweichung der ausgeglichenen Parameter $\hat{c}$, $\hat{i}$ und $\hat{e}$ sowie $\hat{\zeta}_1$, …, $\hat{\zeta}_n$ und $\hat{s}_1$, …, $\hat{s}_n$ kann mithilfe der Kofaktorenmatrix der Unbekannten

$$\mathbf{Q}_{\mathrm{xx}} = \mathbf{N}^{-1} \tag{13}$$

und dem Schätzwert für den Varianzfaktor $\hat{\sigma}_0^2$ berechnet werden.

Numerische Untersuchungen mit diesem Ansatz haben gezeigt, dass die Redundanzanteile der Beobachtungen ζ_1, …, ζ_n und s_1, …, s_n derartig klein sind im Vergleich zu denen der Beobachtungen f_1, …, f_n, dass man die Beobachtungen ζ_i und s_i als feste Parameter in die Ausgleichung einführen kann, ohne dass sich die ausgeglichenen Parameter $\hat{c}$, $\hat{i}$, $\hat{e}$ und deren Standardabweichungen signifikant ändern. Im folgenden Kapitel wird daher ein Modell vorgestellt, in dem die Werte ζ_i und s_i als feste Parameter eingeführt werden.

4.2 Lineares funktionales Modell

Führt man die Kippwinkel ζ_i und die Strecken s_i als feste Parameter ein und verwendet unter der Annahme kleiner Winkel die Näherung

$$\tan f_a \approx f_a \quad , \tag{14}$$

erhält man mit den Substitutionen

$$a = \cos i \tan c \quad \text{und} \quad b = \sin i \tag{15}$$

ein *lineares* funktionales Modell

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{\sin \zeta_1} a + \frac{1}{\tan \zeta_1} b + \frac{1}{s_1} e \\ &\vdots \\ f_n &= \frac{1}{\sin \zeta_n} a + \frac{1}{\tan \zeta_n} b + \frac{1}{s_n} e \end{aligned} \tag{16}$$

und daraus die Beobachtungsgleichungen

$$\begin{aligned} f_1 + v_{f_1} &= \frac{1}{\sin \zeta_1} a + \frac{1}{\tan \zeta_1} b + \frac{1}{s_1} e \\ &\vdots \\ f_n + v_{f_n} &= \frac{1}{\sin \zeta_n} a + \frac{1}{\tan \zeta_n} b + \frac{1}{s_n} e \end{aligned} \quad . \tag{17}$$

Fasst man die unbekannten Parameter zum Vektor

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a & b & e \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

zusammen, lautet die Funktionalmatrix

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{\sin\zeta_1} & \dfrac{1}{\tan\zeta_1} & \dfrac{1}{s_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dfrac{1}{\sin\zeta_n} & \dfrac{1}{\tan\zeta_n} & \dfrac{1}{s_n} \end{bmatrix} , \tag{19}$$

der Beobachtungsvektor ergibt sich zu

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} f_1 & \cdots & f_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} . \tag{20}$$

Mit der Gewichtsmatrix **P** der Beobachtungen f_i ergibt sich mit dem Varianzfaktor σ_0^2 das lineare Modell zu

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{l} \;\text{ mit }\; D(\mathbf{l} \mid \sigma_0^2) = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} . \tag{21}$$

Die Schätzwerte für die Unbekannten $\hat{a}$, $\hat{b}$ und $\hat{e}$ erhält man direkt (ohne Iteration) aus den Normalgleichungen

$$\underbrace{\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{A}}_{\mathbf{N}}\mathbf{x} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{l} , \tag{22}$$

die Schätzwerte für den Kippachsenfehler $\hat{i}$ und den Zielachsenfehler $\hat{c}$ ergeben sich aus (15) zu

$$\hat{i} = \arcsin\hat{b} \;\text{ und }\; \hat{c} = \arctan\left(\frac{\hat{a}}{\cos\hat{i}}\right) . \tag{23}$$

Die Standardabweichung der ausgeglichenen Parameter $\hat{a}$, $\hat{b}$ und $\hat{e}$ kann mithilfe der Kofaktorenmatrix der Unbekannten

$$\mathbf{Q}_{\mathrm{xx}} = \mathbf{N}^{-1} \tag{24}$$

und dem Schätzwert für den Varianzfaktor $\hat{\sigma}_0^2$ berechnet werden, die Standardabweichungen $\sigma_{\hat{i}}$ und $\sigma_{\hat{c}}$ können mithilfe der Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung unter Verwendung der funktionalen Zusammenhänge (23) berechnet werden.

4.3 Anwendungsbeispiel

Zur Bestimmung von Ziel-, Kippachsenfehler und Exzentrizität der Zielachse des Laserscanners Zoller + Fröhlich Imager 5003 werden sechs Zielpunkte in zwei Lagen gescannt, die durch Holzkugeln mit einem Durchmesser von 15 cm signalisiert wurden (s. Abb. 4).

Abb. 4: Messaufbau

Als Messwerte liegen die kartesischen Koordinaten im Scannerkoordinatensystem der erfassten Teile der Kugeloberflächen vor, aus denen die Koordinaten der Kugelmittelpunkte mithilfe einer Ausgleichung berechnet werden. Aus diesen Koordinaten können die Drehkreisrichtungen α_{i_I} , α_{i_II} , die Kippwinkel ζ_{i_I} , ζ_{i_II} und die Strecken s_{i_I} , s_{i_II} in Lage 1 und 2 berechnet werden. Die in Tabelle 1 aufgeführten Kippwinkel ζ_i und die Strecken s_i erhält man aus Mittelbildung der Messungen in Lage 1 und 2, die Fehlereinflüsse f_i erhält man aus

$$f_i = \frac{\alpha_{i_\mathrm{II}} - \alpha_{i_\mathrm{I}}}{2} \quad . \tag{25}$$

Tabelle 1: Eingangswerte für die Ausgleichung

Punkt	ζ [gon]	f [gon]	s [m]
1	14,8307	–0,2186	1,0264
2	64,4901	–0,0224	1,7666
3	86,0189	–0,0077	2,5352
4	111,6051	–0,0023	2,1790
5	140,4797	0,0077	2,2562
6	164,0993	0,0207	1,7081

Mit den Werten in Tabelle 1 kann die Berechnung von Ziel- und Kippachsenfehler und der Exzentrizität der Zielachse gemäß Kapitel 4.1 oder 4.2 erfolgen. In diesem Beispiel erfolgt die Berechnung mit dem Ansatz aus Kapitel 4.2, als Gewichtsmatrix für die Beobachtungen wird **P** = **E** verwendet. Der Zielachsenfehler ergibt sich zu $\hat{c} = -37{,}80$ mgon mit $\sigma_{\hat{c}} = 5.36$ mgon, für den Kippachsenfehler erhält man $\hat{i} = -30{,}7$ mgon mit $\sigma_{\hat{i}} = 1{,}90$ mgon, die Exzentrizität der Zielachse ergibt sich zu $\hat{e} = 1{,}17$ mm mit $\sigma_{\hat{e}} = 0{,}26$ mm. Ob sich die berechneten Parameter signifikant vom Wert Null unterscheiden, kann mithilfe eines *t*-Tests (siehe z. B. NIEMEIER 2002, S. 66 ff.) überprüft werden. Der Test ergibt in diesem Beispiel, dass sich alle Parameter bei einer zweiseitigen Alternativhypothese und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5$ % signifikant von null unterscheiden.

5 Auswahl günstiger Konfigurationen

Die Frage nach einem günstigen Messaufbau kann anhand numerischer Untersuchungen mithilfe der Interpretation der Redundanzanteile der Beobachtungen beantwortet werden. Verwendet man dazu den Ansatz aus Kapitel 4.2, ergeben sich folgende Arbeitsschritte:

- Auswahl von Kippwinkeln, die den Messbereich von einer steilen Visur „nach oben“ bis zu einer steilen Visur „nach unten“ abdecken, z. B. ζ_i = 10, 20, …, 180, 190 gon
- Abschätzen der zugehörigen Strecken s_i, bei denen der Messstrahl auf den Zielpunkt trifft
- Durchführung der Ausgleichung aus Kapitel 4.2 und zusätzlich Berechnung der Redundanzanteile r_i, siehe z. B. NIEMEIER (2002, S. 280), der Beobachtungen f_i
- Sukzessive Elimination der Beobachtung f_i mit dem größten Redundanzanteil, in Analogie zur Optimierung von Beobachtungsplänen in geodätischen Netzen

Numerische Untersuchungen haben gezeigt, dass der Verbleib von acht Zielpunkten einen guten Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und Kontrolliertheit der Beobachtungen darstellt. Als Minimum sollten, wie im Beispiel in Kapitel 4.3, sechs Zielpunkte verwendet werden, die Gesamtredundanz des Ausgleichungsproblems beträgt in diesem Fall r = 3.

Die Frage nach der günstigsten Anordnung der Punkte lässt sich nicht allgemein gültig beantworten, da das Ergebnis von den Zielweiten abhängig ist. Umfangreiche numerische Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Zielpunkte derart angeordnet sein sollten, dass möglichst steile Visuren „nach oben“ und „nach unten“ auftreten.

6 Anbringung der Achsenfehler

Die Anbringung des Einflusses der Achsenfehler erfolgt derart, dass die kartesischen Koordinaten der gesamten Punktwolke aus einem Scan in Lage 1 zunächst in Polarkoordinaten umgerechnet werden. Dann kann der Einfluss der Achsenfehler für jede Drehkreisrichtung jeweils mit (4) berechnet werden. Die gesuchten Kugelkoordinaten λ_i ergeben sich zu

$$\lambda_i = \alpha_{i_1} + f_i \quad , \tag{26}$$

die Kugelkoordinaten ϑ_i erhält man nach STAHLBERG (1997) aus

$$\cos\vartheta_i = \cos i \cos c \cos\zeta_{i_1} - \sin i \sin c \quad , \tag{27}$$

danach erfolgt die Umrechnung in kartesische Koordinaten.

Ob die berechneten Achsenfehler und die Achsexzentrizität an die Messungen angebracht werden müssen, hängt von den Genauigkeitsanforderungen des Projektes ab. Die Lageabweichungen, die aufgrund der Fehler entstehen, können numerisch abgeschätzt werden. Unter Verwendung der Fehler aus Kapitel 4.3 werden für Kippwinkel im Bereich von 10 bis 190 gon mit (4) die jeweiligen Fehlereinflüsse berechnet. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Zielweite, die hier mit 15 m angenommen wird, ergeben sich die in Abbildung 5 ersichtlichen Lageabweichungen Δl_α aufgrund verfälschter Drehkreisrichtun-

gen. Die Auswirkungen der Fehler auf die Kippwinkel können beurteilt werden, indem man von den „gemessenen“ Kippwinkeln die korrigierten Kippwinkel aus (27) abzieht. Bei Zielweiten von 15 m ergeben sich dann die in Abbildung 5 dargestellten Lageabweichungen Δl_ζ aufgrund verfälschter Kippwinkel.

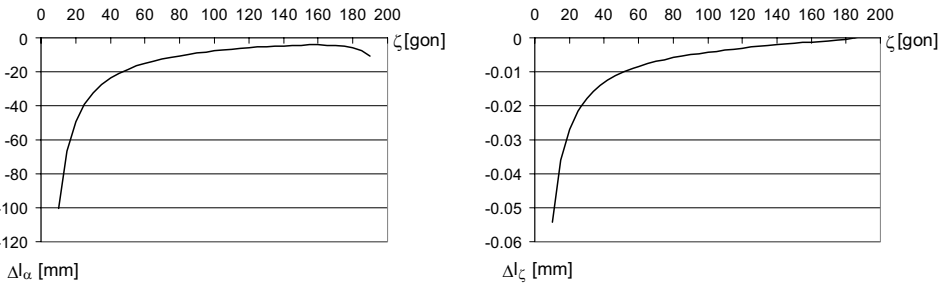


Abb. 5: Lageabweichungen Δl_α und Δl_ζ aufgrund Achsenfehler und Exzentrizität

Es ist zu erkennen, dass die Achsenfehler und die Exzentrizität in diesem Beispiel bei steilen Visuren Lageabweichungen Δl_α von mehreren Zentimetern verursachen. Der Einfluss der Achsenfehler auf die Kippwinkel ist deutlich geringer, sodass die Lageabweichungen Δl_ζ auch bei sehr steilen Visuren unterhalb eines Zehntelmillimeters liegen. Auf die Anbringung der Achsenfehler an die Kippwinkel kann in der Praxis verzichtet werden.

7 Schlussbetrachtung

Mit den entwickelten Formeln steht dem Anwender ein praktikables Verfahren zur Bestimmung von Ziel-, Kippachsenfehler und Exzentrizität der Zielachse eines terrestrischen Laserscanners mit tachymetrischem Messprinzip zur Verfügung. Es wäre wünschenswert, dass die Eingabe von Achsenfehlern und Exzentrizität in der Gerätesoftware möglich ist, sodass vom Gerät automatisch korrigierte Koordinaten der Punktwolke ausgegeben werden. In weiteren Untersuchungen könnte überprüft werden, ob sich die Instrumentenfehler auch unter Verwendung einfacherer Zielmarken zuverlässig bestimmen lassen.

Literatur

Deumlich, F. & R. Staiger (2002): *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik.* 9., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Koch, K. R. (2000): *Einführung in die Bayes-Statistik.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Niemeier, W. (2002): *Ausgleichungsrechnung*. Walter de Gruyter, Berlin, New York

Stahlberg, C. (1997): *Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung*. ZfV 122, Nr. 5. 225-235

Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus – Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich

Thomas KERSTEN, Harald STERNBERG und Enrico STIEMER

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird der vergleichende Einsatz von zwei terrestrischen 3D-Laserscanning-Systemen bei der Erfassung und Modellierung von zwei historischen Sälen im Hamburger Rathaus vorgestellt. Die beiden Säle (Kaisersaal und Großer Festsaal) wurden in ca. drei Stunden mit dem Mensi GS100 von Trimble und mit dem IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich von fünf (GS100) bzw. 22 Standpunkten (IMAGER) gescannt, um aus der jeweiligen gesamten Punktwolke verschiedene Schnitte, 2D-Pläne und 3D-Modelle beispielhaft zu generieren. Die Georeferenzierung der Punktwolken in das lokale Koordinatensystem wurde über Zieltafeln mit einer Genauigkeit von ca. 5 mm (GS100) bzw. 8 mm (IMAGER) erreicht. Die Qualität der aus den Laserscannerdaten modellierten, digitalen CAD-Daten wird durch Referenzstrecken kontrolliert und die Effizienz der jeweiligen Datenerfassung und Auswertung wird miteinander verglichen und bewertet.

1 Einleitung

Seit Ende der 1990er-Jahre die ersten terrestrischen 3D-Laserscanner auf dem Markt kamen, haben die Systeme eine enorme technische Weiterentwicklung vollzogen, sodass sie sich als 3D-Messtechnik neben und auch in Ergänzung zu den bekannten Technologien wie Photogrammetrie und Tachymetrie etablieren. Durch die Verbesserungen von Hardware und Software sind die Systeme heute in der Lage, komplexe Formen und Objekte mit einem dichten 3D-Punktraster aufzunehmen und entsprechend auszuwerten. Dennoch sind Untersuchungen über Genauigkeiten und effizienten Projekteinsatz aus diesem Grunde sowohl für das Verständnis und für die Verbesserung als auch für eine breite Marktakzeptanz solcher Messsysteme sehr wichtig. Der Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg hat in einem Pilotprojekt vergleichend untersucht, inwieweit sich die beiden terrestrischen 3D-Laserscanning-Systeme Mensi GS100 von Trimble und IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich bei der Innenraumaufnahme zweier historischer Säle im Hamburger Rathaus effizient einsetzen lassen. Die Qualität der aus den Laserscannerdaten modellierten digitalen CAD-Daten wurde mit Referenzstrecken verglichen.

Genauigkeitsuntersuchungen und praktische Erfahrungen mit dem Mensi GS100 an der HAW Hamburg wurden von KERSTEN et al. (2004) und STERNBERG et al. (2005) veröffentlicht. Als Beispiele für den Einsatz von terrestrischen Laserscannern für Aufnahmen historischer Innenräume dienen die Erfassung von Schloss Neuschwanstein mit dem IMAGER 5003 von STRACKENBROCK (2004) und der kleinen Hagia Sophia Moschee in Istanbul mit dem 3dLMS (Prototyp der TU Darmstadt) von DÜPPE & KLEIN (2005). LORRA & JAEGER (2004) berichten über den effizienten Einsatz des IMAGER 5003 bei der Tatortvermessung.

2 Aufnahmeobjekte und Laserscanning-Systeme

Die als Aufnahmeobjekte gewählten historischen Säle zeichnen sich durch ein großes Messvolumen mit bis zu 17 × 41 × 16 m und durch Detailreichtum aus. Um diesen beiden Gesichtspunkten gerecht zu werden, wurden zwei mit unterschiedlichen Messprinzipien arbeitende Laserscanner-Systeme bei der Aufnahme verwendet.

Abb. 1: Ansichten des Kaisersaals (links) und des Großen Festsaals im Hamburger Rathaus (rechts)

2.1 Kaisersaal und Großer Festsaal im Hamburger Rathaus

Das Hamburger Rathaus wurde 1886–1897 von einer Architektengemeinschaft unter der Leitung Martin Hallers als prächtiger Sandsteinbau im Stil der Neo-Renaissance gebaut und ist heute Sitz von Senat und Bürgerschaft. Das Rathaus ist 111 Meter lang und besitzt einen 112 Meter hohen Turm. Im Rathaus befinden sich 647 Räume, von denen die prachtvollsten der Kaisersaal und der Große Festsaal sind (Abb. 1). Beide Säle sind mit viel Marmor, Goldverzierungen und kostbaren Gemälden ausgestattet. Sie dienen heute für Empfänge und gesellschaftliche Veranstaltungen. Der Kaisersaal erhielt seinen Namen nach einem Besuch von Kaiser Wilhelm II. anlässlich der Eröffnung des Nord-Ostsee-Kanals. Er verfügt über eine auffällige Deckenmalerei, die die Handelsschifffahrt unter deutscher Flagge symbolisiert. Die Wände, an denen Porträts bedeutender Bürgermeister Hamburgs hängen, sind mit einer Tapete aus gepresstem Rindsleder bedeckt, die größte dieser Art in Deutschland aus dem 19. Jahrhundert. Im reich verzierten großen Festsaal werden heute noch Empfänge für Politiker des In- und Auslandes gegeben. Über der beschnitzten Senatsestrade mit den Bürgermeistersitzen glänzt das goldene Staatswappen. Direkt darüber befindet sich ein Wandgemälde, das den Hamburger Hafen zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeigt. Weitere große Wandgemälde, von Hugo Vogel bis 1909 gemalt, zeigen die Geschichte Hamburgs von 800 bis 1900. Umsäumt werden die Wandmalereien in 13 Meter Höhe mit 62 Stadtwappen des alten Hansebundes. Drei riesige Kronleuchter mit jeweils 240 Glühbirnen und einem Gewicht von 1,7 Tonnen erhellen den Saal.

2.2 Laserscanning-Systeme Mensi GS100 und IMAGER 5003

Das 3D-Laserscanning-System GS100 wird von Mensi S.A., Frankreich, hergestellt und der IMAGER 5003 wird von Zoller & Fröhlich in Wangen im Allgäu produziert. Die wichtigsten technischen Spezifikationen der beiden verwendeten Systeme sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die wesentlichen Unterschiede zwischen GS100 und IMAGER 5003 werden wie folgt aufgeführt: Das Impulslaufzeitverfahren des GS100 (Wellenlänge 532 nm) erlaubt die Messung von längeren Scandistanzen als der IMAGER 5003 (780 nm), dagegen ist die Scangeschwindigkeit des GS100 aufgrund des Messverfahrens deutlich geringer. Das Sichtfeld ist beim IMAGER 5003 wesentlich größer als beim GS100 und erlaubt somit eine höhere Flexibilität des Systems in Innenräumen. Dagegen weist der GS100 eine höhere Winkelauflösung und eine deutlich geringere Spotgröße des Laserstrahls am Objekt auf. Ein Laserpunkt wird beim GS100 in 25 m Entfernung 3 mm groß abgebildet, während der Laserpunkt beim IMAGER 5003 auf derselben Distanz 11 mm groß sein kann. Durch die integrierte Kamera bietet der GS100 die Möglichkeit, die Punktwolke mit RGB-Werten farblich zu kodieren.

Tabelle 1: Technische Spezifikationen der Laserscanner Mensi GS100 und IMAGER 5003

	Mensi GS100	**IMAGER 5003**
Messmethode	Impulslaufzeit	Phasendifferenz
Sichtfeld	360° horiz., 60° vertikal.	360° horiz., 310° vertikal
Optimale Scandistanz	2–100 m	1–53,5 m
Scangeschwindigkeit	bis zu 5000 Punkte/sec	bis zu 500.000 Punkte/sec
Streckenmessgenauigkeit (25m)	6 mm (einfache Strecke)	~ 6mm
Winkelauflösung	0,002 gon	0,020 gon
Strahldivergenz / Laserspot in 25 m	0,06 mrad / 3 mm	0,22 mrad / ca. 11 mm
Integrierte Kamera	RGB 768 × 576 Pixel	keine

Die Abbildung 2 zeigt beide 3D-Laserscanning-Systeme mit entsprechendem Zubehör. Zum GS100 gehören eine robuste Transportkiste und ein Notebook zur Steuerung des Messinstrumentes bei der Datenerfassung. Eine sinnvolle Ergänzung des Systems ist ein effizienter Generator (z. B. Honda-Stromerzeuger EU 10i, Leistung ca. 1 KW) für den Betrieb im Außendienst, da nicht überall eine Stromversorgung vom Netz gewährleistet werden kann. Der IMAGER 5003 ist auf einem fahrbaren Stativ montiert und wird durch eine Batterie versorgt. Der Steuerung des Scanners erfolgt ebenfalls über ein Notebook.

Ein wesentlicher Bestandteil der Laserscanning-Systeme ist die Software, die für beide verwendeten Systeme in Tabelle 2 zusammengefasst ist. Die Software bietet die Steuerung des Scanners bei der Aufnahme über ein Notebook, die Registrierung und Georeferenzierung der verschiedenen Punktwolken und eine Vielzahl von Optionen für deren Auswertung bis zur Einpassung von geometrischen Primitiven in die Punktwolke zur CAD-Konstruktion.

Abb. 2: Das 3D-Laserscanning-System Mensi GS100 der HAW Hamburg mit Zubehör (links), GS100-Innenansicht mit digitaler Kamera und Spiegel (Mitte), IMAGER 5003 mit Zubehör (rechts)

Tabelle 2: Software für die Laserscanning-Systeme Mensi GS100 und IMAGER 5003

Software	**Mensi GS100**	**IMAGER 5003**
Scanning	PointScape V1.2	LR Viewer2
Datenverarbeitung	Real Works Survey V4.1 zur Registrierung und Georeferenzierung, OfficeSurvey Module	LFM Modeller V3.64c zur Registrierung und Georeferenzierung, Einpassen von geometrischen Primitiven in Punktwolke
Datenverarbeitung	3Dipsos V3.0 zur Registrierung und Georeferenzierung, Einpassen von geometrischen Primitiven in Punktwolke	LFM Server + Generator 3.64i zur Bearbeitung von großen Punktwolken

3 Datenerfassung, Registrierung und Georeferenzierung

Die Arbeitsschritte vor der eigentlichen Bearbeitung der 3D-Punktwolken sind die Datenerfassung, die Registrierung (Verknüpfung) und die Georeferenzierung der Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Dazu wurden vor dem Scannen in beiden Räumen entsprechende Zielmarken (Targets) angebracht, die später eine Transformation vom Scanner- in das übergeordnete Koordinatensystem gewährleisteten. Die verschiedenen Zielmarken (Abb. 3 Mitte), neun für den GS100 und 29 für den IMAGER 5003, wurden mit einem Tachymeter TCRA 1105 von Leica in einem lokalen 3D-Netz eingemessen und in einer Ausgleichung mit einer Genauigkeit von ca. 4 mm bestimmt.

Für das Laserscanning in den beiden Sälen des Hamburger Rathauses standen insgesamt fünf Stunden zur Verfügung. Aus zeitlichen Gründen konnte mit dem GS100 nur von fünf Scannerstandpunkten gescannt werden (s. Abb. 3 Mitte), während man durch die kurzen Scanzeiten von ca. 7 Minuten je Scan mit dem IMAGER 5003 von 22 Standpunkten Auf-

nahmen durchführen konnte. Als Auflösung wurde die Einstellung „,high“ gewählt, in der ein 360°-Scan eine Größe von 10.000 Pixel × 5967 Linien aufweist. Dies führt in 25 m Entfernung zu einem Punktabstand von 16 × 16 mm. Der Standpunktwechsel mit dem IMAGER 5003 konnte durch den Rolluntersatz sehr schnell und flexibel vollzogen werden, dagegen war beim GS100 ein Auf- und Abbau des Systems von jeweils ca. 10 Minuten erforderlich. Die Steuerung der beiden Scanner erfolgte über ein Notebook mit der Software PointScape V1.2 (GS100) bzw. LRViewer 2 (IMAGER 5003). Um die gescannten Punktwolken verschiedener Standpunkte automatisch verknüpfen zu können, wurde jede sichtbare grüne Zieltafel mit dem GS100 separat vor jedem Objektscan gescannt. Die nummerierten Targets für den IMAGER 5003 wurden in jedem Panoramascan des Standpunktes mit erfasst. Leider konnte das Scannen der beiden Säle nicht unter Idealbedingungen durchgeführt werden, da sowohl Besuchergruppen im Rathaus als auch eingeladene Laserscanner-Interessierte manchmal ein leichtes Vibrieren des Parkettbodens verursachten. Jedoch konnten keine signifikanten Auswirkungen des Vibrierens bei der Auswertung festgestellt werden. Wichtige statistische Angaben über das Scannen im Hamburger Rathaus sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Obwohl der Punktabstand beim Scannen bei beiden Systemen ungefähr gleich groß gewählt wurde, ergaben sich durch die vielen Standpunkte und durch das größere Sichtfeld des IMAGER 5003 eine deutlich höhere Anzahl gescannter Punkte und damit ein größeres Datenvolumen.

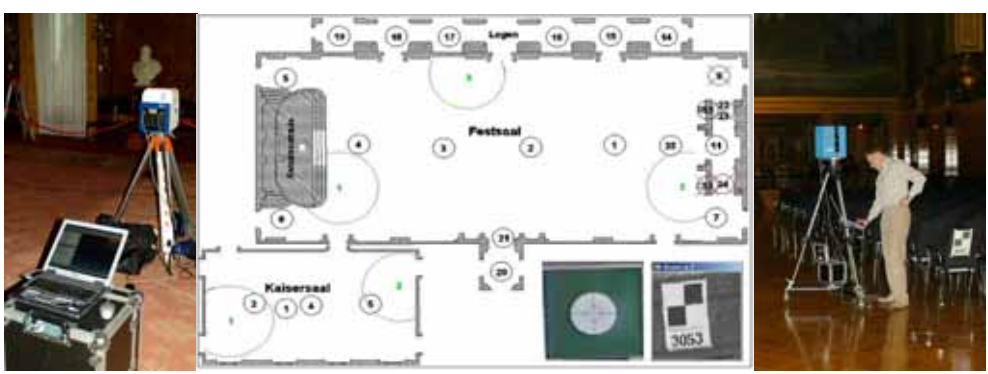


Abb. 3: Links: Mensi GS100 im Kaisersaal, Mitte: Übersicht der Scanstationen: GS100 große Kreise und IMAGER 5003 kleine Kreise sowie Zielmarken für GS100 und IMAGER 5003, rechts: IMAGER 5003 im Festsaal.

Die anschließende Registrierung und Georeferenzierung der acht Punktwolken erfolgte beim GS100 im Programm Real Works Survey 4.1 automatisch über die drei bzw. fünf Zieltafeln mit einer Genauigkeit von 3 mm (Kaisersaal) bzw. 5 mm (Festsaal). Dagegen wurden aufgrund der großen Datenmengen die Punktwolken jedes einzelnen Standpunktes des IMAGER 5003 über jeweils drei bis sechs Zielmarken mit der Software LFM Modeller 3.64 und einer Genauigkeit von 8 mm direkt georeferenziert. Bei vier Standpunkten war dies aufgrund zu wenig sichtbarer Targets nicht möglich. (siehe durchgekreuzte Kreise in Abb. 3). Abbildung 4 zeigt die registrierten und georeferenzierten Punktwolken vom Großen Festsaal und Kaisersaal, wobei die GS100-Daten durch die Bilder der Videokamera farbkodiert, die Daten des IMAGER 5003 jedoch nur in Grautönen dargestellt sind.

Tabelle 3: Scanstatistik für die Aufnahme im Hamburger Rathaus mit Mensi GS100 und IMAGER 5003

Scanstatistik	**Mensi GS100**	**IMAGER 5003**
# Zielmarken	9	29
# Scanner-Standpunkte	5	22
# Scans	8	22
# Punkte (in Mio.)	24,5	1076
Datenvolumen [MB]	500	5400
Punktabstand in 25 m [cm]/Scan	1,9	1,6
Scan-Zeit/Station [min]	50	7
Scan-Zeit insgesamt [min]	190	154

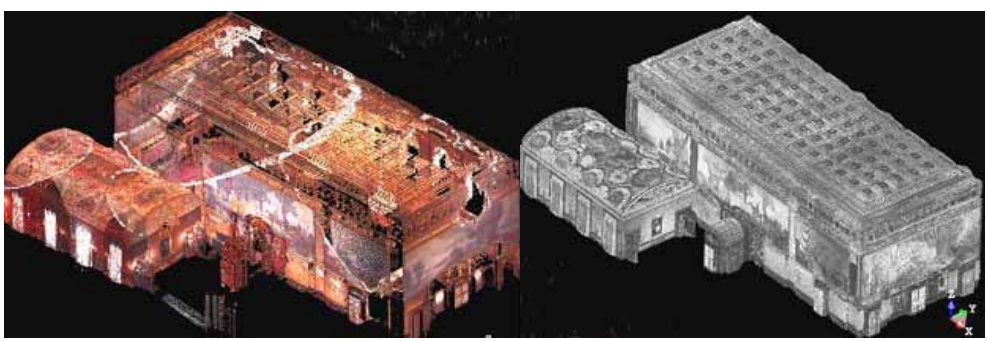


Abb. 4: Georeferenzierte Punktwolken beider Säle: Mensi GS100 (links), IMAGER 5003 (rechts)

4 Auswertung der Punktwolken

Die Generierung von 2D-Schnitten und einfachen 3D-Modellen stand im Vordergrund der Auswertung der Punktwolken. Dazu konnte für den GS100 weiterhin die Software Real Works Survey 4.1 genutzt werden. Diese ermöglicht das manuelle und automatische Erzeugen von Schnittebenen, die Einrechnung von Polylinien in die Punktwolke der Schnitte und den Export von Polylinien zu AutoCAD. Diese Polylinien waren die Grundlage, um in AutoCAD sowohl die Grundrisse und Aufrisse, wie in Abbildung 5 und 7 dargestellt, als auch 3D-Modelle (Abb. 6) zu konstruieren. Für die Konstruktion des Wandstückes im Großen Festsaal (Abb. 8) wurden beispielsweise 48 Schnittebenen in einem Abstand von 10 cm mit einer Stärke von 5 cm gebildet und daraus Polylinien erzeugt.

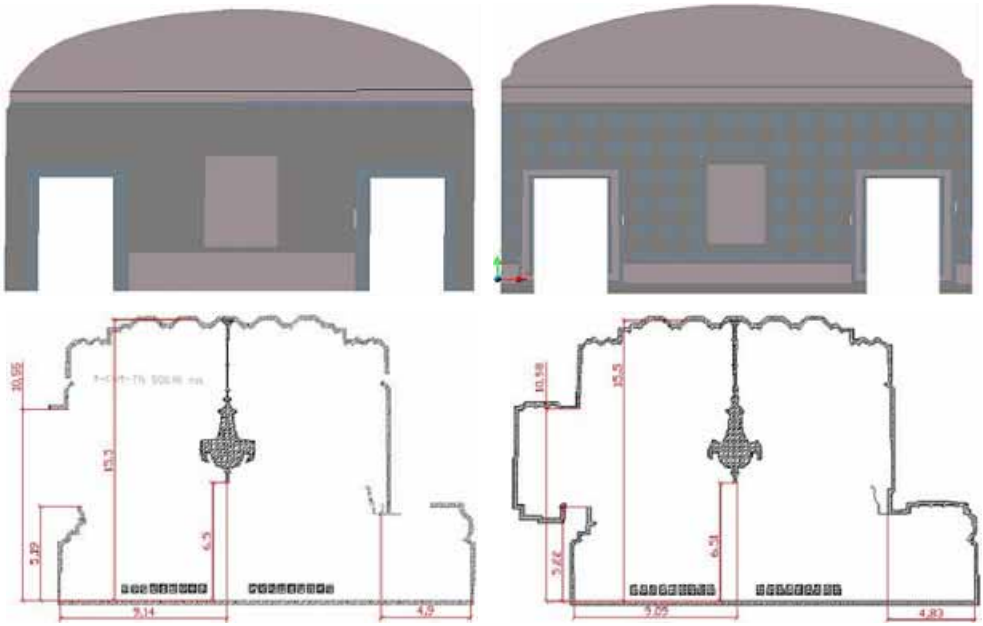


Abb. 5: Detaillierungsgrad der 2D-Konstruktion einer Wand im Kaisersaal (oben) und eines Querschnittes im Großen Festsaal (unten), konstruiert aus den Punktwolken des GS100 (links) und des IMAGER 5003 (rechts)

Der Vergleich von Strecken in den 2D-Plänen mit Referenzstrecken ergab eine durchschnittliche Abweichung von 17 mm. Im 3D-Modell einer Tür (Abb. 6) ergab die Abweichung zwischen dem CAD-Modell und der Referenzstrecke durchschnittlich 10 mm.

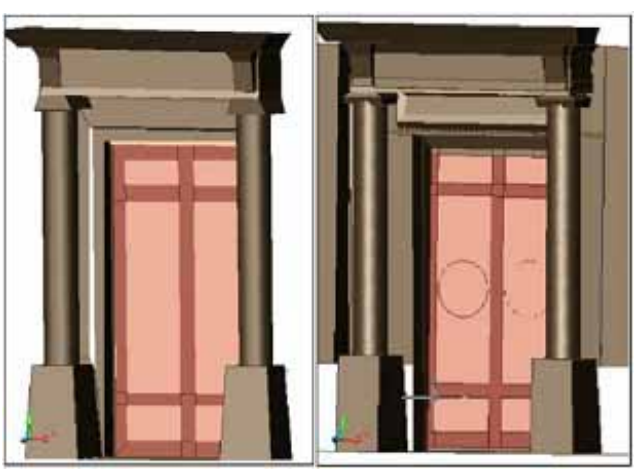


Abb. 6: Detaillierungsgrad des 3D-Modells einer Tür im Festsaal konstruiert aus den Punktwolken des GS100 (links) und des IMAGER 5003 (rechts)

Für die Auswertung der Punktwolken des IMAGER 5003 wurde nicht die LFM Modeller Software verwendet, da diese ähnlich der 3Dipsos Software von Mensi nur die Generierung von 3D-Primitiven ermöglicht. Hier wurde eine weitere Software von Zoller & Fröhlich, der LFM Server, eingesetzt. Mit dieser Software ist es möglich, Teile der Punktwolke in voller Auflösung als Hintergrundbild für die Konstruktion in AutoCAD zu laden. Zur Generierung der 2D-Pläne wurden manuell Schnittebenen im LFM Server erzeugt und die gewonnene Punktwolke direkt als Hintergrund in das verbundene Programm AutoCAD übernommen. Mit diesem Modul war es gut möglich, die großen Datenmengen des IMAGER 5003 effektiv zu verwalten und zügig die 2D-Schnitte und die 3D-Modelle in AutoCAD zu erzeugen. Die Abweichungen zwischen den Referenzstrecken und den Strecken im 2D-Plan betrugen durchschnittlich 13 mm. Im 3D-Modell wurden die Abweichungen mit 11 mm bestimmt.

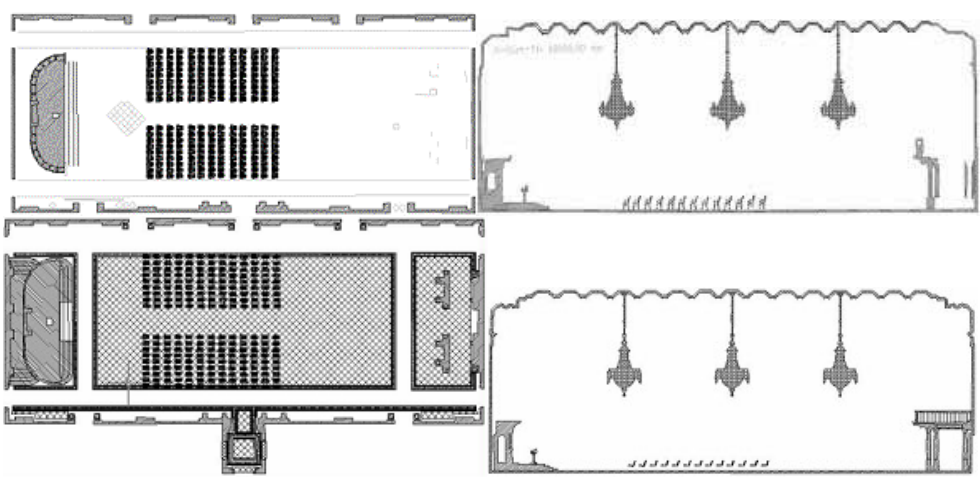


Abb. 7: Detaillierungsgrad der 3D-Pläne (Grundriss und Längsschnitt) des großen Festsaales aus den Daten des GS100 (oben) und des IMAGER 5003 (unten) konstruiert.

In Abbildung 7 ist deutlich zu sehen, dass die Ausarbeitungen aus den Punktwolken des IMAGER 5003 detailreicher sind, da die Punktdichte im Objekt aufgrund der größeren Standpunktzahl deutlich höher war und weniger Lücken aufgrund von Abschattungen aufwies. Des Weiteren war die Konstruktion mit dem LFM Server weniger zeitaufwändig als mit Real Works Survey. Dies führte auch dazu, dass bei der Konstruktion der Seitenwand des Festsaales mit Real Works Survey nur ein 2D-Plan erzeugt werden konnte, während es in der gleichen Bearbeitungszeit mit dem LFM Server und AutoCAD möglich war, ein 3D-Modell zu generieren (Abb. 8).

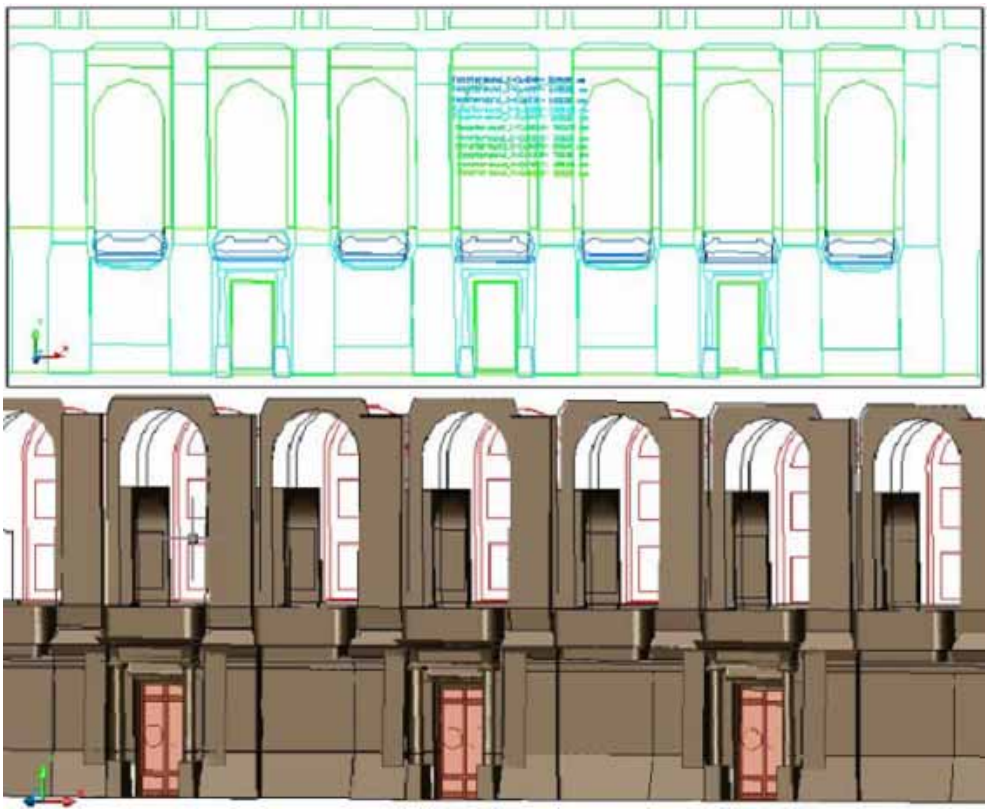


Abb. 8: Konstruktion der Seitenwand des Festsaales: 2D-Plan mit Real Works Survey (oben) und 3D-Modell mit LFM Server und AutoCAD (unten) erstellt

5 Vergleich der beiden Laserscanning-Systeme

Die Bearbeitungszeiten der beiden Projekte Kaisersaal und Großer Festsaal sind in Tabelle 4 nach den wesentlichen Arbeitsschritten unterteilt für den Mensi GS100 und IMAGER 5003 aufgeführt.

Es zeigte sich in diesem Projekt, dass der Zeitaufwand für die Datenaufnahme im Verhältnis zur Datenauswertung um den Faktor 30 weit auseinander klafft. Während das Scannen im Rathaus und die anschließende Datenvorbereitung (Registrierung/Georeferenzierung, etc.) automatisiert ablaufen, ist für die Erstellung von 2D-Schnitten, von Grundrissen und von 3D-Modellen sehr viel manuelle Arbeit erforderlich. Aufgrund der höheren Punktdichte und der hohen Anzahl Scannerstandpunkte (geringe Verdeckungen) konnte mit den Daten des IMAGER 5003 eine schnellere Auswertung durchgeführt werden. Daher ist die Projektbearbeitungszeit mit dem IMAGER um 15 % (zwei Arbeitstage) effizienter als mit dem GS100 (s. Tab. 4).

Tabelle 4: Bearbeitungszeit je Arbeitsschritt mit den Systemen Mensi GS100 und IMAGER 5003

Arbeitsschritt/Bearbeitungszeit [h]	**Mensi GS100**	**IMAGER 5003**
Scannen	3,2	2,6
3D-Netzausgleichung	4,0	4,0
Registrierung/Georeferenzierung	2,0	2,0
Datenaufbereitung, -konvertierung	0,5	2,0
Erstellung 2D-Schnitte	44,5	39,0
Erstellung 2D-Plan/3D-Modell	53,0	41,5
Zeit insgesamt [h]	**107,2**	**91,1**

Der Einsatz beider Laserscanning-Systeme (Hardware und Software) wurde nach der Projektbearbeitung anhand verschiedener Beurteilungskriterien im Vergleich bewertet. Die Beurteilungskriterien für die Bewertung sind in Tabelle 5 aufgeführt, wobei für jedes Kriterium eine Gewichtung und eine Benotung in Form von Punkten (1 = negativ, 2 = Durchschnitt und 3 = gut) vergeben wurde. Der erstellte Kriterienkatalog soll dabei auch die Anforderungen an eine Aufnahme und Auswertung von historischen Innenräumen berücksichtigen.

Tabelle 5: Beurteilungskriterien für den Einsatz der Systeme Mensi GS100 und IMAGER 5003

Beurteilungskriterien/Bewertung	**Gewicht [%]**	**Mensi GS100**	**IMAGER 5003**
Sichtfeld des Scanners	10	2	3
Scanreichweite	10	3	2
Scangeschwindigkeit	10	1	3
Anzahl gescannter Punkte	10	2	3
Datenvolumen	5	3	2
Flexibilität des Systems in Innenräumen	5	2	3
Registrierung/Georeferenzierung	5	3	2
Automation in der Datenauswertung	30	1	1
Genauigkeit	5	2	2
Resultate/Produkte	10	2	2
Punktzahl gesamt	**100**	**180**	**205**
Punktbedeutung: 1 = negativ, 2 = Durchschnitt, 3 = gut			

Negativ werden hier in erster Linie der Automationsgrad in der Auswertung von Punktwolken bei beiden Systemen und die Scangeschwindigkeit des Mensi GS100 bewertet. Alle anderen Kriterien werden entweder mit durchschnittlich oder gut beurteilt. Insgesamt wird der IMAGER 5003 für diese Projektbearbeitung aufgrund seiner besseren Leistung beim Scannen von Innenräumen gegenüber dem GS100 mit 205 zu 180 Punkten etwas besser beurteilt.

6 Fazit und Ausblick

Die beiden eingesetzten terrestrischen Laserscanning-Systeme haben sich bei der Datenerfassung im Hamburger Rathaus und bei der Auswertung der Punktwolken für Anwendungsgebiete in Innenräumen bewährt. Trotz der nicht idealen Bedingungen beim Scannen konnten mit beiden Systemen gute Resultate in Form von 2D-Schnitten, Grundriss und 3D-Modell erzielt werden. Es zeigte sich aber auch deutlich, dass die hohe Datenmenge vom IMAGER 5003 zwar bei der Datenaufbereitung mehr Aufwand bereitete als die GS100-Punktwolken, doch durch die hohe Punktdichte und die geringeren Abschattungen konnte wesentlich detaillierter ausgewertet werden. Die Datenerfassung ist mit beiden Scannern recht einfach, doch die Auswertung der Punktwolken ist sehr komplex und zeitaufwändig (bis zu einem Verhältnis von 1:30 für Aufnahme/Auswertung). Daher ist es sehr wichtig, bei einem Laserscanning-System sowohl die Hardware als auch die Software für bevorstehende Anwendungen in Betracht zu ziehen. Somit zeigte sich auch in diesem Projekt, dass es keinen Scanner für alle Anwendungen gibt, sondern eher für jede Anwendung einen speziellen Scanner. In diesem Projekt hat sich der IMAGER 5003 als flexibler und geeigneter erwiesen, da die Punktdichte und die vielen Standpunkte in kurzer Zeit eine bessere Auswertung ermöglichten. Generell ist 3D-Laserscanning eine innovative Technologie, deren Einsatz gerade auch in der Denkmalpflege ein hohes Potenzial aufweist.

Durch eine hohe Automatisierung der Auswerteprozesse werden Laserscanning-Systeme in Zukunft eine zunehmende Akzeptanz im Markt erreichen. Die Systeme werden auch schneller, genauer, handlicher und hoffentlich auch günstiger werden. Eine Datenfusion von hochauflösenden Digitalkameras mit Punktwolken für Visualisierungs- und Interpretationsaufgaben scheint daher auch eine konsequente Weiterentwicklung der Systeme darzustellen.

7 Dank

Die Autoren bedanken sich bei Dipl.-Ing. K. Mechelke, Dipl.-Ing. C. Acevedo Pardo (beide HAW Hamburg), Dipl.-Ing. S. Kruse und Dipl.-Ing. J. Soumagne (beide Ingenieurbüro Dr. Wesemann, Bochum/Hamburg) für die Datenerfassung im Hamburger Rathaus.

Literatur

Düppe, R.-D. & B. Klein (2005): *Blockausgleichung mit Flächen für Laserpunktwolken.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 266-277

Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K. & C. Acevedo Pardo (2004): *Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 98-107

Lorra, K. & R. R. Jaeger (2004): *Laserscanner können Tatortarbeit revolutionieren*. Der Kriminalist 12/2004. 479-484

Sternberg, H., Kersten, T. & N. Conseil (2005): *Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 56-65

Strackenbrock, B. (2004): *Visualization of "Thronsaal Neuschwanstein" with scanner and panorama camera.* IAPRS, Vol. XXXIV, PART 5/W16. H.-G. Maas & D. Schneider (Eds.), Proceedings of the ISPRS working group V/1 'Panoramic Photogrammetry Workshop', Dresden, Germany, February 19-22, http://www.tu-dresden.de/fghgipf/ photo/PanoramicPhotogrammetryWorkshop2004/Proceedings.htm

Qualitätsstandards in der Architekturvermessung – Anwendung auf das 3D-Laserscanning

Arne SEMMLER

Zusammenfassung

Der Beitrag beschäftigt sich mit den Anforderungen an die Produkte einer Architekturvermessung aus der Sicht des Nutzers: Was muss das Vermessungsergebnis leisten, um für die Weiterarbeit geeignet zu sein? Hier ergeben sich je nach Anwendungsfeld unterschiedliche Schwerpunkte, die längst nicht immer nur auf der messtechnischen Genauigkeit liegen. Die existierenden Anforderungsprofile sind häufig sehr stark auf 2D-Ergebnisse ausgerichtet – die Qualitäten, die das 3D-Laserscanning bieten kann, müssen erst noch definiert werden.

1 Anwendungsfelder in der Architekturvermessung

Grundsätzlich ist das terrestrische Laserscanning in allen Feldern der Architekturvermessung eine hilfreiche Ergänzung der bisherigen Aufmaßverfahren. Vier Haupteinsatzfelder können benannt werden: Bestandsaufnahme für Planungsaufgaben, für denkmalgerechte Dokumentation und für Managementaufgaben (FM) sowie die baubegleitende Dokumentation.

1.1 Anwendungsfeld: Bestandsaufnahme für Planungsaufgaben

Bei der Bestandsaufnahme für Planungsaufgaben geht es um die Rekonstruktion der Bauwerksgeometrien für die Weiterverarbeitung in CAD-Systemen. Das Übergabeformat ist meistens das DWG- oder DXF-Format. Das Hauptaugenmerk liegt auf einer guten Strukturierung und der problemlosen Weiterverwendung in den Zielapplikationen. Weiterhin muss das Aufmaß schnell und preiswert erfolgen. Die Wiedergabe findet zurzeit meist noch in Form von 2D-Plänen statt.

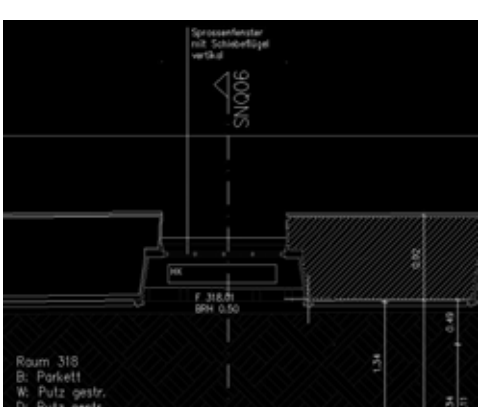


Abb. 1: Beispiel für die sorgfältige Strukturierung eines Architekturaufmaßes: Bauteile werden von einer geschlossenen Polylinie umrissen, die zur automatisierten Mengen-/Flächenermittlung oder Schraffur heran gezogen werden kann. Es findet eine saubere Unterscheidung nach Rohbau und Ausbau statt.

1.2 Anwendungsfeld: Denkmalgerechte Dokumentation

Die denkmalgerechte Dokumentation besteht zumeist nicht nur aus einer maßlichen Dokumentation, sondern auch aus Kartierungen nach verschiedenen Kriterien, Raumbüchern und Fotodokumentationen. Es werden hohe Anforderungen an die semantische und geometrische Detaillierung gestellt.

Einen Sonderfall stellen Notdokumentationen im Fall von Abrissen dar. Hier zählen die Aspekte Schnelligkeit und Vollständigkeit.

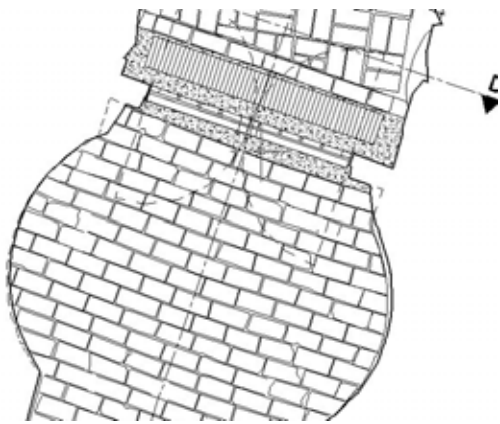


Abb. 2: Beispiel für den hohen Detaillierungsgrad eines verformungsgerechten Aufmaßes für den Denkmalbereich.

1.3 Anwendungsfeld: Bestandsaufnahme für Managementaufgaben

Für das Facility Management werden zunehmend ebenfalls geometrisch richtige Grundlagen verwendet, wenn diese schnell und preiswert zur Verfügung gestellt werden können. Hierbei stehen die Sachinformationen jedoch im Vordergrund. Das hochauflösende Laserscanning bietet hier aufgrund seines abbildenden Charakters Vorteile – die Erfassung ist schnell und vollständig. Weiterhin sind die zu erfassenden Gebäude/Anlagen häufig in Benutzung, d. h. die Aufnahme muss schnell und störungsfrei erfolgen. Im Ergebnis liegt der Schwerpunkt auf der Strukturierung und digitalen Weiterverarbeitbarkeit der Daten.

1.4 Anwendungsfeld: Baubegleitende Dokumentation

Die Dokumentation im Bauprozess dient zumeist dem Vergleich der ausgeführten mit der geplanten Bauleistung. Damit der Bauprozess nicht unterbrochen wird, muss die Aufnahme, aber auch die Auswertung und Darstellung sehr schnell erfolgen. Außerdem bestehen hohe Anforderungen an die geometrische Genauigkeit. Die Richtigkeit der Aussagen muss unbedingt gewährleistet sein, da von den Ergebnissen Entscheidungen über ggf. kostenintensive Rückbauten abhängen. Das Laserscanning bietet den Vorteil, dass mit einem hohen Anteil an automatisierter Auswertung das Risiko einer Verfälschung oder Fehlinterpretation reduziert werden kann. Als Grundlage dienen zumeist 2D- oder 3D-CAD-Dateien.

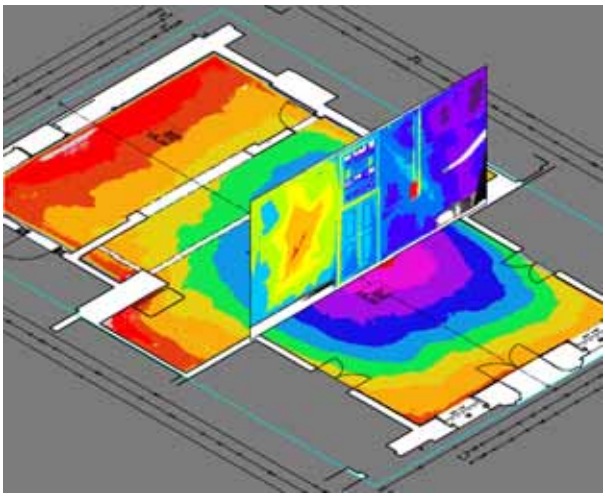


Abb. 3: Analyseergebnisse wie Abweichungsdiagramme müssen schnell und ohne langen Auswerteprozess zur Verfügung stehen

1.5 Überblick: Anforderungen an Aufmaße aus verschiedenen Anwendungsfeldern der Architekturvermessung

Zur Vereinfachung lassen sich die vier benannten Anwendungsfelder der Architekturvermessung wie folgt nach den Kriterien Genauigkeit, Detaillierung, Strukturierung, Schnelligkeit und Kosten klassifizieren:

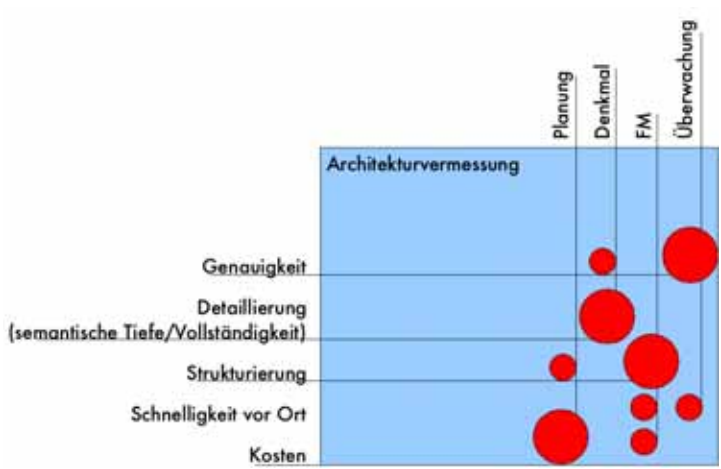


Abb. 4: Anforderungen aus verschiedenen Bereichen der Architekturvermessung

2 Von der Aufgabe zu Anforderungen an Genauigkeit und Detaillierung

2.1 Erwartungen an das Laserscanning in der Architekturvermessung

Die Erwartungen an das Laserscanning in der Architekturvermessung sind nicht zuletzt durch die Versprechungen der Hersteller hoch gesteckt:

- Kürzere Einsatzzeiten vor Ort
- Vielfältigere und bessere Ergebnisse wie neue und weiter reichende, genauere und detailliertere Ergebnisse auch bei schwierigen räumlichen Situationen
- Schnellere und damit kostengünstigere Abwicklung der Aufgaben
- Durchgehende Dreidimensionalität

Die Ergebnisse können diese Erwartungen leider häufig nicht erfüllen. Dies liegt zum Teil am Fehlen allgemein verbindlicher Standards für die erwünschten Ergebnisse, auf die sich der die Vermessungsleistung Nachfragende berufen könnte, sowie an Missverständnissen bezüglich des Begriffes „Genauigkeit".

2.2 Genauigkeit – ein subjektiv belegter Begriff

Genauigkeit ist nur scheinbar eine exakte und messbare Größe – für viele Fachleute anderer Disziplinen fallen unter Genauigkeit vor allem Fragen der Detaillierung und Strukturierung. Zur „messbaren" Genauigkeit gibt es in den verschiedenen Fachgebieten Normen und Vorschriften, so auch im Hochbau.

Die im Hochbau geltenden Normen zu Bautoleranzen lassen jedoch aus Sicht der Vermessungsaufgabe Interpretationsspielräume zu. So gibt es zwar verschiedene Obergrenzen für diverse Kriterien (Ebenheit, Grenzabmaße, Winkelmaße), die bauteilweise festgelegt sind, aber keine durchgängige Unterscheidung zwischen Lagegenauigkeit und „Gestaltgenauigkeit" (Oberfläche etc.). Die zugehörigen Normen sind DIN 18201: Begriffe und Anwendungen, DIN 18202: Baustoffunabhängige Toleranzen, DIN 18203: Zulässige Toleranzen für Bauteile aus Beton, Stahl und Holz.

2.3 Begriffsbestimmung: Genauigkeit vs. Detaillierung

Eines der häufigsten Missverständnisse zwischen Vermessungsingenieuren und ihren Kunden/Partnern aus anderen am Bau beteiligten Fachdisziplinen liegt in der sauberen Unterscheidung, aber auch der Wechselbeziehung zwischen Genauigkeit und Detaillierung. *Genauigkeit* bezeichnet die geometrische Exaktheit des Modells gegenüber der Realität, definiert über Toleranzen und Abweichungen. Die *Detaillierung* bezeichnet die inhaltliche Tiefe, also die semantische Präzision des Modells, also auch die Ergänzung der neutralen Daten um Struktur und Interpretation.

Aufgabe des Vermessungsingenieurs ist es, gemeinsam mit dem Nutzer der Daten aus den nicht immer eindeutig festgelegten Grundlagen die Anforderungen an das Aufmaß und die tatsächliche „Genauigkeit" und Detaillierung der Endprodukte zu formulieren, da es hierfür noch keine durchgängigen Systeme gibt. Erfahrungswerte aus der Sicht des Nutzers zeigen, dass die Genauigkeit des Endproduktes mindestens doppelt so hoch sein muss wie die zu-

lässigen Bautoleranzen im jeweiligen Gewerk, damit der Nutzer der Daten eindeutige Aussagen ableiten kann. Für den Vermessungsingenieur beginnt hier die weitere Definition der erforderlichen Genauigkeit für Messungen, Messwerte und Messergebnis (vgl. DIN 18710 Teil 1). Hierfür kann im Mittel davon ausgegangen werden, dass das Laserscanning-System überschlagen doppelt so genau arbeiten muss, wie die festgelegte Genauigkeit des Endproduktes.

2.4 Beispiel: Ebenheitstoleranz im Rohbau

Als Beispiel, was dies für die Vermessungspraxis bedeuten kann, wird hier die Ebenheitstoleranz eines Bauteils im Rohbau angeführt:

- Anforderung an die Ebenheit eines nicht flächenfertigen Bauteils (Rohbau) nach DIN 18202 bei Messpunktabstand 100 mm: ±10 mm
- Architekt braucht Exaktheit des Endprodukts: ±5 mm, um eine Aussage zur Qualität des Bauteils treffen zu können.
- Messsystem muss mindestens liefern: ±2,5 mm

Bei flächenfertigen Bauteilen sind die Anforderungen noch höher. Es ist zu beachten, dass der Aufwand, diese Genauigkeiten auch bei 3D-Daten zu halten, sehr hoch wird, da die Anforderungen im Bauwesen dreidimensional, also ohne Unterscheidung von Lage und Höhe gelten. Im Stahlbau liegen die Toleranzen im Millimeterbereich. Daraus ergibt sich, dass im Bereich der Architekturvermessung je nach Anforderung sehr schnell der Bereich der hohen bis „sehr hohen Genauigkeit“ nach DIN 18710, Teil 1, erreicht wird, wenn die erwünschten Vorzüge des voll dreidimensionalen Aufmaßes mittels Laserscanner eingelöst werden sollen.

3 (Qualitäts-)Standards für die Architekturvermessung

3.1 Existierende Standards: Bauen im Bestand/Denkmalpflege (Schwerpunkt: Detaillierung)

Wesentliche Literatur und allgemein verwendeter Standard zur Vereinheitlichung der Ergebnisse von Dokumentationen in diesem Feld der Architekturvermessung ist:

ECKSTEIN (1999): Empfehlungen für Baudokumentationen. Eckstein nimmt die Definition von Genauigkeitsstufen für die Architekturvermessung (Stufen I bis IV) vor. Hierbei ist zu beachten, dass neben tolerierten Abweichungen bezüglich der Geometrie zwischen ±10 cm und ±2 cm insbesondere auch zahlreiche Anforderungen an die semantische Tiefe der Bestandsaufnahme gestellt werden. GROß et al. (2002): Anforderungen an eine Bestandsdokumentation in der Baudenkmalpflege. Ergänzt die Genauigkeitsstufen von Eckstein 1999 im Hinblick auf die inhaltliche Dimension und hierbei speziell die weiteren Produkte einer denkmalgerechten Dokumentation neben der geometrischen Erfassung durch die Einführung von Bestandsaufnahme-Kategorien.

Diese national eingeführten Quasistandards können auch für die Vermessung für die Bauplanung Anwendung finden, wenngleich sie hierbei Schwächen aufweisen. Daher sind

unverbindliche Beiblätter zur HOAI entstanden, die das sog. „Architektenaufmaß“ – Sonderleistung in der Leistungsphase Vorermittlung – genauer zu fassen suchen und sogar mit Richtpreisen belegen, die jedoch unserer Kenntnis nach in der Praxis keine Bedeutung haben.

3.2 Existierende Standards: Architekturvermessung im Bauprozess (Schwerpunkt: Genauigkeit)

Die Grundlage für die Anforderungen sind die von den Baubeteiligten einzuhaltenden DIN-Normen 18201 bis 18203 „Toleranzen im Hochbau“. Daraus ableitend können in Anlehnung an die kommende DIN 18710 „Ingenieurvermessung“, Teile 1,2 und 4, die Anforderungen für Vermessungsgenauigkeit abgeleitet werden. Für die Detaillierung des Aufmaßes sowie die Strukturierung der digitalen Information existieren nur ansatzweise Standards. Hier muss im Allgemeinen im Einzelfall eine Festlegung erfolgen. Bezüglich der technischen Seite der standardisierten Datenspeicherung abgeleitet von internationalen Standards eine Untermenge für das Bauwesen: STEP-CDS (Iso-Standardisierung) und IFC 2x (Herstellerinitiative).

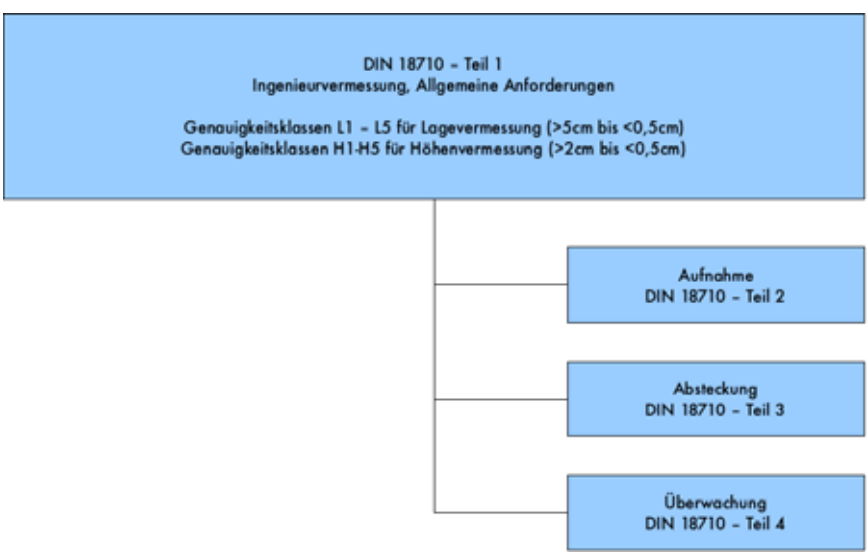


Abb. 5: Schema zur DIN 18710 „Ingenieurvermessung“

3.3 Fehlende Standards

Die existierenden Standards decken naturgemäß vor allem die herkömmlichen Produkte traditioneller Vermessungstechniken ab: 2D-Pläne mit der Unterscheidung nach Lage und Höhe. Dies jedoch ohne ausreichende Berücksichtigung der Qualität des digitalen Produktes bezüglich Strukturierung und Weiterverarbeitbarkeit. Es ist bislang kein zitierfähiger Standard vorhanden, der hier branchenübergreifend Klarheit schafft – dass zusammengehörige Linien, Flächen oder Körper auch in der digitalen Zeichnung eine Einheit bilden müssen, bleibt ein Qualitätsmerkmal des einzelnen Dienstleisters, das allerdings insbesondere

bei der Übertragung in drei Dimensionen erheblich mehr Sorgfalt bei der Erstellung erfordert, als ein Produkt, das lediglich im zweidimensionalen Ausdruck korrekt erscheint. Diese, mit der nun auch in der Baubranche zunehmenden Digitalisierung der Prozessketten erforderlich gewordene, über das Vorhandene hinausgehende Standardisierung steht demnach noch aus.

Die neuartigen Ergebnisse, die der Laserscanner relativ einfach erzeugen kann, wie 3D-Vektordaten, Orthobilder oder 3D-Punktwolken, sind nicht ausreichend standardisiert. Als Folge kommen die spezifischen Produkte des 3D-Laserscannings in Ausschreibungen entweder gar nicht erst vor oder die Ergebnisse sind nicht vergleichbar, da von völlig unterschiedlichen Anforderungen ausgegangen wird. Die Vorteile des Laserscanners liegen somit häufig brach, da aus den Datensätzen konventionelle Ergebnisse (2D-Pläne!) erzeugt werden.

4 Fazit: Entwicklung anwendungsspezifischer Standards

Im Ergebnis ist die Erweiterung bzw. Definition von anwendungsspezifischen (Qualitäts-) Standards für die Produkte der Vermessungsingenieure in Bereichen jenseits der messtechnischen Genauigkeit erforderlich.

Hierbei muss auch eine Harmonisierung bestehender Standards erfolgen. Die Definition könnte auf der Terminologie und den Genauigkeitsklassen der DIN 18710 und den darüber hinaus gehenden Qualitätsanforderungen aus Eckstein etc. als „Fachschalen“ zu der vermessungstechnischen Norm basieren, wobei folgende Aspekte stärker als bisher Berücksichtigung finden müssen:

- 3D-Vermessung/3D-Produkte
- Digitale Weiterverarbeitung
- Neue Produkten aufgrund neuer Mess- und Weiterverarbeitungstechniken
- Semantischen Qualitätsstandards

4.1 Ausblick: Neue Qualitäten einer neuen Technik

Überarbeitete Standards sollen die Zusammenarbeit der Baubeteiligten mit den Architekturvermessern verbessern und insbesondere den Schritt in die dritte Dimension vollziehen. Sie sollen nicht die Vielfältigkeit moderner Vermessungsverfahren einschränken, sondern auch hierfür Raum geben. Sie müssen sich vom eigenen Aufbau her leicht um zusätzliche Ergebnisse erweitern lassen. Die Zielvorstellung wäre die Zusammenfassung nicht nur der hier vorgestellten nationalen Ansätze, um einheitliche Sprachregelungen und Anforderungskataloge erarbeiten zu können.

Das 3D-Laserscanning bringt auch hier neue Impulse, denn schon die Rohdaten der Aufnahme sind im Prinzip ein verwendbares Ergebnis, denn letztendlich handelt es sich um ein 3D-Modell, das sich in Genauigkeitsklassen einordnen lässt – allerdings in Form einer Punktwolke. Folglich reicht die Beschreibung der Genauigkeit diskreter Punkte als Standard hier nicht aus, denn dies würde dazu führen, dass keine Vergleichbarkeit mit anderen Verfahren entsteht. Die Punktwolken stellen für sich ein völlig neuartiges Produkt in der

Architekturvermessung dar, dessen Potenzial noch kaum erkannt wird. Punktwolken lassen sich jedoch zukünftig ähnlich wie bereits für die Automobilindustrie vorgeschlagen (NIEMEIER 2005) auch unmittelbar zur Darstellung und Analyse von Gebäudegeometrien verwenden – die Überführung in Voxel-Modelle ist möglich (vgl. ASCHOFF 2006).

Hybride Vektor/Voxel-Modelle können hier ganz neue Ausgabe- und Verarbeitungsschritte ermöglichen, die nur mit 3D-Scannern zu realisieren sind. Um das Potenzial dieser neuen Vermessungstechnologie auszuschöpfen, müssen in diesem Bereich Anforderungen an die möglichen Ergebnisse formuliert werden, statt Punktwolken in überkommene 2D-Standards zu pressen.

Bis dahin bleiben sie jedoch die einzige vorhandene Referenz. Sie bilden daher derzeit die gültige Grundlage für die tägliche Arbeit. Aufgabe der Forschung und Entwicklung ist die Fortschreibung der Qualitätsmaßstäbe in Richtung auf die neuen und kommenden Technologien.

Literatur

Aschoff, T., Holderied, M. W. & H. Spiecker (2006): *Terrestrische Laserscanner zur Untersuchung von Wäldern als Jagdlebensräume für Fledermäuse*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 280-287

Bürger, T. & T. Tellkamp (1998): *Ein Beitrag zur photogrammetrischen Orientierung von Bildverbänden in verfahrenstechnischen Anlagen.* In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Nr. 5-6/1998. 165-172

DIN 18710: Ingenieurvermessung, Teil 1–4

DIN 18201, 18202, 18203: Toleranzen im Hochbau

Eckstein, G. (1999): *Empfehlungen für Baudokumentationen*, Arbeitshefte des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg, Nr. 7, Stuttgart

Groß, W. & S. Wagner (Hrsg.) (2002): Arbeitsmaterialien zur Denkmalpflege in Brandenburg, Nr. 1: *Anforderungen an eine Bestandsdokumentation in der Baudenkmalpflege*. Erarbeitet von der Abteilung Bestandsforschung, Referat Bauforschung im Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseum, Fulda

Niemeier, W. (2005): *Unfallforschung bei Fahrzeugen mit terrestrischen Laserscannern*. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning 2005, Vortrag: www.haw-hamburg.de/geo/tls2005/tls_2005_progr.htm

Przybilla, H.-J. (1999): *Sensorvermessung im Industrie- und Anlagenbau*. VDI-Berichte Nr. 1454, „Moderne Sensorik für die Bauvermessung“, VDI Verlag, Düsseldorf. 173-183

Semmler, A. (2002): Nidaros-Dom in Trondheim, Dokumentation am Oktogon mit Einsatz digitaler Systeme für die Bauforschung. TU Berlin, Fakultät Architektur, Fachgebiet Bau- und Stadtbaugeschichte.

Laserscanning

Modellierung

Direkte Bestimmung von Zylindern aus 3D-Punkten ohne Nutzung von Oberflächennormalen

Christian BEDER und Wolfgang FÖRSTNER

Zusammenfassung

Die automatische Extraktion von Zylindern aus 3D-Punktwolken ist von zentraler Bedeutung bei der Auswertung von Laserscannerdaten insbesondere bei Industrieanlagen. Das robuste Schätzverfahren RANSAC benötigt direkte Lösungen aus so wenig Datenpunkten wie möglich, um effizient zu arbeiten. Wir werden die algebraischen Bedingungen, die quadratische Formen erfüllen müssen, um einen Zylinder darzustellen, analysieren und verschiedene Verfahren für die Lösung dieses Problems vorstellen. Insbesondere werden wir eine minimale Lösung mit nur fünf 3D-Punkten präsentieren. Anders als andere Ansätze benötigen wir keine Oberflächennormalen, deren Bestimmung im Allgemeinen schwierig ist.

1 Einleitung

Zylinder spielen eine wichtige Rolle in der Geometrie von Industrieanlagen. Bei deren Vermessung kommen vor allen Dingen Laserscanner zum Einsatz, welche zunächst „nur" dichte 3D-Punktwolken liefern. Für Aufgabenstellungen, die über die Visualisierung hinausgehen, ist es von entscheidender Bedeutung, die Punktdaten in Primitive wie z. B. Ebenen und Zylinder zu segmentieren. Während für die Visualisierung die Oberflächennormalen relativ wichtig sind, kann man für die modellgestützte Segmentierung im Prinzip auf sie verzichten. Dies ist insbesondere von Vorteil, da Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Punkten zu ermitteln (vgl. TANG & MEDIONI 2002) insbesondere bei registrierten Daten aus vielen Einzelmessungen ein schwieriges Problem und somit eine unnötige potenzielle Fehlerquelle darstellt.

Eine Übersicht über klassische Verfahren für die Segmentierung auf der Basis von Dreiecksnetzen findet sich z. B. bei PETITJEAN (2002) oder bei HOPPE et al. (1994), wobei hier nicht explizit auf Zylinder eingegangen wurde. Die Benutzung von Oberflächennormalen für die Extraktion von Zylindern aus Punktwolken mithilfe von RANSAC (vgl. CHAPERON & GOULETTE 2001), Gruppierung (vgl. WINKELBACH et al. 2003) oder Hough-Transformation (vgl. VOSSELMAN et al. 2004, PETERNELL et al. 2003) ist weit verbreitet. Die hier präsentierte Lösung (vgl. auch BEDER & FÖRSTNER 2006) kommt ohne Oberflächennormalen aus und erlaubt es, mithilfe eines RANSAC-Verfahrens Zylinder direkt aus einer 3D-Punktwolke zu extrahieren, ohne in dieser zunächst Nachbarschaftsbeziehungen zu etablieren.

Im Gegensatz zu ROTH & LEVINE (1990), die polynomielle Basen für die Beschreibung von Objekten benutzen, welche für Zylinder nicht existieren, verwenden wir die algebraischen Bedingungen, die eine quadratische Form erfüllen muss, um einen Zylinder darzustellen. Zunächst werden wir die Bedingungen für die praktisch relevanten Spezialfälle von Zylin-

der parallel zu bekannten Geraden bzw. Ebenen beschreiben und schließlich für allgemeine Zylinder. Anschließend zeigen wir, wie man die resultierenden direkten Lösungen für die effiziente modellgestützte Segmentierung von „rohen“ 3D-Punktwolken mithilfe des RANSAC-Verfahrens einsetzen kann.

2 Algebraische Bedingungen für Zylinder

2.1 Zylinder parallel zu einer Achse

Für den Fall, dass der Zylinder parallel zu einer bekannten Achse ist, kann man o. B. d. A. annehmen, dass es sich um die Z-Achse handelt, sodass alle Punkte auf dem Zylinder in der Projektion auf die XY-Ebene die Kreisgleichung

$$(X-s)^2+(Y-t)^2-r^2=0 \tag{1}$$

erfüllen müssen. Diese Bedingung ist zunächst quadratisch in den unbekannten Parametern. Benutzt man jedoch die Substitution (vgl. BOOKSTEIN 1979)

$$u=s^2+t^2-r^2\,, \tag{2}$$

erhält man mit drei Punkten die drei linearen Bedingungsgleichungen

$$\begin{bmatrix} 2X_1 & 2Y_1 & -1 \\ 2X_2 & 2Y_2 & -1 \\ 2X_3 & 2Y_3 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ t \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^2+Y_1^2 \\ X_2^2+Y_2^2 \\ X_3^2+Y_3^2 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

welche eine sehr einfache Bestimmung der Zylinderparameter ermöglichen.

2.2 Zylinder parallel zu einer Ebene

Ist der Zylinder parallel zu einer bekannten Ebene, o. B. d. A. der XY-Ebene, dann muss eine Rotation um die Z-Achse existieren, sodass die Projektion in die YZ-Ebene wieder die Kreisgleichung erfüllt. Die unbekannte Rotation um die Z-Achse kann man mithilfe des Sinus und Kosinus, welche die Bedingung

$$a^2+b^2=1 \tag{4}$$

erfüllen, beschreiben, sodass die rotierten Punkte darstellbar sind als

$$\boldsymbol{X}_i'=\begin{bmatrix} aX_i+bY_i \\ -bX_i+aY_i \\ Z_i \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Setzt man diese rotierten Punkte in die Kreisgleichung ein, so erhält man

$$(-bX_i+aY_i)^2+Z_i^2-2(-bX_i+aY_i)s-2Z_it+(s^2+t^2-r^2)=0 \tag{6}$$

oder mit der Substitution wie in (2) für vier Punkte das homogene Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} (-bX_1+aY_1)^2+Z_1^2 & -2(-bX_1+aY_1) & -2Z_1 & 1 \\ (-bX_2+aY_2)^2+Z_2^2 & -2(-bX_2+aY_2) & -2Z_2 & 1 \\ (-bX_3+aY_3)^2+Z_3^2 & -2(-bX_3+aY_3) & -2Z_3 & 1 \\ (-bX_4+aY_4)^2+Z_4^2 & -2(-bX_4+aY_4) & -2Z_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ t \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Diese Matrix ist also singulär, genau dann, wenn alle vier Punkte in der Projektion kozirkulär sind. Also erhält man die gesuchte Rotation, indem man die gemeinsamen Nullstellen der Determinante und der Bedingung (4) berechnet. Diese Determinante ist ein bivariates Polynom 3. Grades, welches sich sehr einfach, wie von BEDER & FÖRSTNER (2006) beschrieben lösen lässt. Ist die Rotation schließlich bekannt, erhält man die restlichen Parameter, wie in Kapitel 2.1 beschrieben.

2.3 Allgemeine Zylinder

Der Zylinder ist ein Spezialfall einer allgemeinen quadratischen Form, welche sich mithilfe von homogenen Koordinaten X und einer homogenen, symmetrischen Matrix C schreiben lässt als

$$\mathbf{X}^\mathsf{T}\mathbf{C}\mathbf{X} = 0\,. \tag{8}$$

Wieder gilt, dass eine Ebene existieren muss, sodass die Projektionen aller Punkte auf diese Ebene kozirkulär sind. Wäre diese Ebene wie in Kapitel 2.1 die XY-Ebene, so müsste wieder die Kreisgleichung (1) erfüllt sein, was sich in der obigen Repräsentation ausdrücken lasst als

$$\mathsf{C}' = \lambda \begin{bmatrix} D' & \boldsymbol{d}' \\ \boldsymbol{d}'^\mathsf{T} & -r^2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

mit den Teilmatrizen

$$D' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{d}' = \begin{bmatrix} -s \\ -t \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Da im Allgemeinen die Projektionsebene nicht bekannt ist, muss der Zylinder entsprechen bewegt werden mit der unbekannten Bewegung

$$M = \begin{bmatrix} R & \boldsymbol{t} \\ \mathbf{0}^\mathsf{T} & 1 \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Der allgemeine Zylinder ist also repräsentierbar durch eine Matrix der Form

$$\begin{aligned} \mathsf{C} &= M^{-T}\mathsf{C}'M^{-1} \\ &= \lambda \begin{bmatrix} RD'R^\mathsf{T} & -RD'R^\mathsf{T}\boldsymbol{t} + R\boldsymbol{d}' \\ -\boldsymbol{t}^\mathsf{T}RD'R^\mathsf{T} + \boldsymbol{d}'^\mathsf{T}R^\mathsf{T} & \boldsymbol{t}^\mathsf{T}RD'R^\mathsf{T}\boldsymbol{t} - 2\boldsymbol{t}^\mathsf{T}R\boldsymbol{d}' - r^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & \boldsymbol{d} \\ \boldsymbol{d}^\mathsf{T} & d \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{12}$$

Aus dieser Darstellung lassen sich nun zehn linear unabhängige, algebraische Bedingungen ableiten. Zunächst sieht man in (12) und (10) sofort, dass D singulär ist und zwei identische Eigenwerte besitzt. Diese Eigenschaft lässt sich analog zur essentiellen Matrix (vgl. FAUGERAS 1993, S.254) algebraisch durch die zehn Bedingungen

$$|\boldsymbol{D}| = 0 \tag{13}$$

$$2\boldsymbol{D}\boldsymbol{D}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{D} - \mathrm{tr}\boldsymbol{D}\boldsymbol{D}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{D} = \underset{3\times 3}{\boldsymbol{0}} \tag{14}$$

darstellen. Da D symmetrisch ist, liefert (14) nur 6 unabhängige Bedingungen. Obwohl (13) direkt aus (14) ableitbar ist, sind die Bedingungen im Allgemeinen dennoch linear unabhängig, sodass man insgesamt 7 linear unabhängige Bedingungen erhält. Weiterhin gilt, dass

$$\boldsymbol{D}\boldsymbol{d} = \lambda^2 \boldsymbol{R}\boldsymbol{D}'\boldsymbol{R}^{\mathsf{T}}(-\boldsymbol{R}\boldsymbol{D}'\boldsymbol{R}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{t} + \boldsymbol{R}\boldsymbol{d}') = \lambda \boldsymbol{d} \,. \tag{15}$$

Also ist d ein Eigenvektor von D. Somit erhält man drei weitere, linear unabhängige Bedingungen

$$[\boldsymbol{d}]_{\times}\boldsymbol{D}\boldsymbol{d} = \boldsymbol{0} \,. \tag{16}$$

Zusammenfassend stellen also (13), (14) und (16) zehn linear unabhängige Bedingungen für symmetrische, homogene Matrizen dar, damit diese einen Zylinder repräsentieren. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze vorgeschlagen, wie man diese Bedingungen nutzen kann, um aus 3D-Punkten Zylinder zu berechnen.

2.3.1 Zylinder aus neun Punkten

Sind neun Punkte gegeben, so reicht Gleichung (8) vollständig aus, um ein homogenes lineares Gleichungssystem aufzustellen, zu lösen und somit alle Elemente von C zu bestimmen.

2.3.2 Zylinder aus acht Punkten

Sind nur acht Punkte gegeben, so ist der Lösungsraum des homogenen linearen Gleichungssystems aus Bedingung (8) zweidimensional. Die Lösung ist also

$$\mathsf{C} = x\mathsf{C}_1 + \mathsf{C}_2 \tag{17}$$

für ein unbekanntes x. Für die Bestimmung von x nutzt man nun die zusätzliche Bedingung (13), welche ein Polynom 3. Grades in x ist (vgl. HARTLEY & ZISSERMAN 2000, S. 264).

2.3.3 Zylinder aus sieben Punkten

Bei sieben Punkten ist der Lösungsraum aus Bedingung (8) dreidimensional, also

$$\mathsf{C} = x\mathsf{C}_1 + y\mathsf{C}_2 + \mathsf{C}_3 \,. \tag{18}$$

Die Gleichungen (13), (14) und (16) sind nun zehn Polynome 3. Grades in den beiden Unbekannten x und y. Ein lineares Lösungsverfahren hierfür findet sich bei PHILIP (1996).

2.3.4 Zylinder aus sechs Punkten

Im Fall von sechs Punkten ist der Lösungsraum aus Bedingung (8) schließlich vierdimensional, d. h.

$$\mathsf{C} = x\mathsf{C}_1 + y\mathsf{C}_2 + z\mathsf{C}_3 + \mathsf{C}_4 \,. \tag{19}$$

Daher sind Gleichungen (13), (14) und (16) nun zehn Polynome 3. Grades in drei Unbekannten. Wie von STEWENIUS (2006) und BEDER & FÖRSTNER (2006) gezeigt, lässt sich dieses Problem mithilfe von Gröbnerbasen auf ein Eigenwertproblem zurückführen und sehr effizient lösen.

2.3.5 Zylinder aus fünf Punkten

Die Bestimmung eines Zylinders aus fünf Punkten funktioniert unseres Wissens nicht nach dem obigen Schema. Stattdessen bestimmen wir ähnlich wie in Kapitel 2.2 zunächst die Richtung der Zylinderachse. Dazu rotiert man die Zylinderachse, sodass sie in Richtung der Z-Achse zeigt, also die Projektionen aller Punkte in die XY-Ebene kozirkulär sind. Mithilfe von Quaternionen lässt sich diese Rotation schreiben als

$$\boldsymbol{R}(a,b) = \frac{1}{1+a^2+b^2}\begin{bmatrix} 1+a^2-b^2 & 2ab & 2b \\ 2ab & 1-a^2+b^2 & -2a \\ -2b & 2a & 1-a^2-b^2 \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Explizit sind die Koordinaten der rotierten Punkte nun also

$$\begin{bmatrix} X_i'(a,b) \\ Y_i'(a,b) \\ Z_i'(a,b) \end{bmatrix} = \frac{1}{1+a^2+b^2}\begin{bmatrix} X_i a^2 - X_i b^2 + 2Y_i ab + 2Z_i b + X_i \\ -Y_i a^2 + Y_i b^2 + 2X_i ab - 2Z_i a + Y_i \\ -Z_i a^2 - Z_i b^2 + 2Y_i a - 2X_i b + Z_i \end{bmatrix}. \tag{21}$$

Substituiert man wieder mit Gleichung (2), so ist die Kozirkularität der fünf Punkte in der XY-Ebene darstellbar als homogenes Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} X_1'^2(a,b) + Y_1'^2(a,b) & -2X_1'(a,b) & -2Y_1'(a,b) & 1 \\ X_2'^2(a,b) + Y_2'^2(a,b) & -2X_2'(a,b) & -2Y_2'(a,b) & 1 \\ X_3'^2(a,b) + Y_3'^2(a,b) & -2X_3'(a,b) & -2Y_3'(a,b) & 1 \\ X_4'^2(a,b) + Y_4'^2(a,b) & -2X_4'(a,b) & -2Y_4'(a,b) & 1 \\ X_5'^2(a,b) + Y_5'^2(a,b) & -2X_5'(a,b) & -2Y_5'(a,b) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ t \\ u \end{bmatrix} = \boldsymbol{H}(a,b) \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ t \\ u \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{22}$$

Jede der fünf 4 × 4-Submatrizen von H(a,b) muss nun singulär sein. Die fünf Determinanten sind gebrochen rationale Funktionen in den Rotationsparametern a und b. Betrachtet man nur die Zähler der Determinanten, so kann man sehen, dass es sich um bivariate Polynome 6. Grades handelt. Bei BEDER & FÖRSTNER (2006) wird gezeigt, wie man die gemeinsamen Nullstellen mithilfe von Bernsteinpolynomen effizient berechnet. Kennt man nun die Richtung der Zylinderachse, lassen sich die restlichen Zylinderparameter wie in Kapitel 2.1 gezeigt berechnen.

3 Robuste Schätzung und Segmentierung mit RANSAC

Verfahren für die direkte Bestimmung von Objekten aus einer minimalen Anzahl von Beobachtungen sind vor allen Dingen für die robuste Schätzung relevant. Das RANSAC-Verfahren von FISCHLER & BOLLES (1981) arbeitet dazu wie folgt:

1. Bestimme eine zufällige Teilmenge von s Punkten und berechne daraus den Zylinder mit einem der Verfahren aus Kapitel 2.
2. Bestimme die Teilmenge S_i von Punkten, deren Distanz vom geschätzten Zylinder unterhalb einer gegebenen Schranke liegt.
3. Wiederhole die beiden Schritte N mal.
4. Wähle die größte Teilmenge S_i aus und schätze den Zylinder statistisch optimal aus diesen Punkten. Nutze hierzu die direkte Lösung als initiale Näherung.

Zwei Faktoren bestimmen die Laufzeiten dieses Verfahrens. In jeder Iteration muss der Zylinder neu berechnet werden, sodass effiziente direkte Methoden hier unbedingt den iterativen Verfahren vorzuziehen sind. Die Anzahl der Iterationen lässt sich wie folgt bestimmen (vgl. HARTLEY & ZISSERMANN 2000, S. 104): Um mit Wahrscheinlichkeit p sicherzustellen, dass mindestens einmal eine ausreißerfreie Teilmenge aus s Punkten gezogen wird, wobei ε der Anteil an Ausreißern in den Daten ist, benötigt man mindestens

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-(1-\epsilon)^s)} \tag{23}$$

Iterationen. Insbesondere ist die Anzahl der Iterationen exponentiell von der Größe der Teilmenge s abhängig. Konkret bedeutet das, dass, wenn man von einem Ausreißeranteil von ε = 50 % ausgeht und die gewünschten Erfolgswahrscheinlichkeit p = 99 % beträgt, so benötigt man für s = 9 Punkte N = 2356 Iterationen, für s = 8 Punkte N = 1177 Iterationen, für s = 7 Punkte N = 588 Iterationen, für s = 6 Punkte N = 293 Iterationen und für s = 5 Punkte N = 146 Iterationen. Wie man sehen kann ist der Laufzeitunterschied deutlich, wenn man mit Ausreißern in den Daten rechnen muss und verschärft sich, je höher die Ausreißerquote ist. Das häufig vorgebrachte Argument, man habe beim Laserscanner sowieso immer ausreichend viele Punkte zur Verfügung, setzt daher vollständig und fehlerfrei segmentierte sowie ausreißerfreie Daten voraus, was zurzeit nur durch aufwändige und teure semiautomatische Auswerteverfahren erreicht werden kann.

Das RANSAC-Verfahren lässt sich auch für die modellgestützte Segmentierung von Punktwolken einsetzen. Betrachtet man alle Punkte, die nicht zum selben Segment gehören, als Ausreißer einer Schätzung, so kann man wie folgt verfahren: Man schätzt zunächst robust den dominantesten Zylinder in der Punktwolke und entferne alle zu diesem gehörende Punkte. Diesen Vorgang wiederholt man, bis alle Zylinder gefunden wurden. Da RANSAC nur dann effizient mit sehr hohen Ausreißerraten umgehen kann, wenn die Teilmengengröße klein genug ist, sollte für diese Anwendung unbedingt der 5-Punkte-Algorithmus benutzt werden. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis für einen Datensatz, bestehend aus mehreren Rohren mit ca. 170.000 Punkten ohne bekannte Nachbarschaftsbeziehungen.

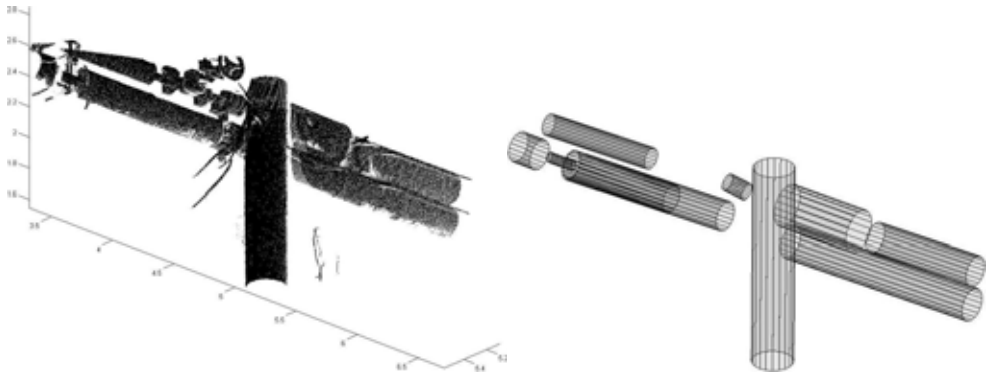


Abb. 1: 3D-Punktwolke und die aus ihr automatisch extrahierten Zylinder (Freundlicherweise zur Verfügung gestellt von G. Vosselman & T. Rabbani)

4 Zusammenfassung

Wir haben algebraische Bedingungen für quadratische Formen abgeleitet, welche Zylinder repräsentieren. Daraus ergeben sich effiziente direkte Lösungen für die Bestimmung von Zylindern aus 3D-Punkten einschließlich der wichtigen Spezialfälle von Zylindern parallel zu bekannten Geraden bzw. Ebenen und dem minimalen Fall eines allgemeinen Zylinders aus fünf Punkten. Vor allen Dingen benötigen wir keine Oberflächennormalen, deren Bestimmung insbesondere bei registrierten Punktwolken aus mehreren Messungen eine schwierige und daher potenziell fehlerträchtige Aufgabe darstellt. Die präsentierten direkten Verfahren ermöglichen eine effiziente automatische Segmentierung von 3D-Punktwolken mithilfe des RANSAC-Verfahrens. Ferner lassen sich die direkten Lösungen einsetzen, um beispielsweise Näherungswerte für optimale Schätzungen zu erzeugen sowie semi-automatische Verfahren zur Zylinderextraktion zu unterstützen.

Literatur

Beder, C. & W. Förstner (2006): *Direct Solutions for Computung Cylinders from Minimal Sets of 3D Points.* Proceedings of the European Conference on Computer Vision, noch nicht erschienen

Bookstein, F. L. (1979): *Fitting conic sections to scattered data.* Computer Graphics and Image Processing, 9(1). 56-71

Chaperon, T. & F. Goulette (2001): *Extracting cylinders in full 3d data using random sampling method and the Gaussian image*. Proceedings of the Vision Modeling and Visualization Conference. 35-42

Faugeras, O. (1993): *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint.* MIT Press

Fischler, M. A. & R. C. Bolles (1981): *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. Communications of the Academy of Computing Machinery, 24(6). 381-395

Fischler M. A. & R. C. Bolles (1981): *A RANSAC-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data*. Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence , 637-643

Hartley, R. & A. Zisserman (2000): *Multiple View Geometry in Computer Vision.* Cambridge University Press

Peternell, M., Pottmann, H. & T. Steiner (2003): *Hough transform and Laguerre geometry fort he recognition and reconstruction of special 3d shapes*. Technical Report, Institute of Geometry, Vienna University of Technology, Austria

Petitjean, S. (2002): *A survey of methods for recovering quadrics in triangle meshes.* ACM Computing Surveys, 34(2). 211-262

Philip, J. (1996): *A non-iterative algorithm for determining all essential matrices corresponding to five point pairs*. Photogrammetric Record, 15(88). 589-599

Roth, G. & M. D. Levine (1990): *Segmentation of geometric signals using robust fitting.* Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition. 826-831

Stewenius, H., Engels, C. & D. Nister (2006): *Recent developments on direct relative orientation*. ISPRS Journal, noch nicht erschienen

Tang, C. K. & G. Medioni (2002): Curvature-augmented tensor voting for shape inference from noisy 3d data. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24(6). 858-864

Vosselman, G., Gorte, B. G. H., Sithole, G. & T. Rabbani (2004): *Recognizing structure in laser scanner point clouds*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 46. 33-38

Winkelbach, S., Westphal, R. & T. Gösling (2003): Pose estimation of cylindrical fragments for semi-automatic bone fracture reduction. Proceedings of the DAGM Symposium. 566-573

Glättung von aus Laserscannerpunktwolken extrahierten Profilen

Anne BIENERT

Zusammenfassung

Die messtechnische Dokumentation von Objekten erfolgt in vielen Anwendungsbereichen, wie Architektur und Denkmalpflege, vorzugsweise in Form von Profilen, welche u. a. aus Laserscannerdaten generiert worden sein können. Aufgrund des Messrauschens ist jeder Laserscannerpunkt mit einem zufälligen Fehler behaftet. Die Größe des Fehlers ist abhängig vom verwendeten Messverfahren des eingesetzten Laserscanners. Um ein rauschfreies Profil zu erhalten, muss es einer Glättung unterzogen werden.

In diesem Beitrag werden entwickelte Glättungsalgorithmen für aus Laserscannerpunktwolken extrahierte Profile, bestehend aus Geradenstücken und Kreisbogenelementen, vorgestellt. Eine Optimierung des Glättungsprozesses wird durch die Anpassung bestimmter Steuerparameter erreicht. Als Ergebnisse liegen ein geglättetes Profil und Informationen über die Genauigkeit der Laserscannerdaten vor, die im weiteren Verlauf vektorisiert werden. Abschließend werden Beispiele von geglätteten Profilen vorgestellt.

1 Einleitung

Durch den Einsatz eines terrestrischen Laserscanners bei der Gebäudeaufnahme kann in kurzer Zeit die komplette Geometrie erfasst werden. Durch Modellierung und Visualisierung dieser Daten zu einem 3D-Model ist es möglich, Informationen über das Objekt zu erhalten. Allerdings können beispielsweise spezielle Maße oder Verläufe von Gebäudemauern entlang einer bestimmten Achse nur schwer entnommen werden. Schnitte in beliebigen Ebenen erleichtern dies. Dabei wird ein Profil erstellt, indem eine Filterung der Punkte in der gewünschten Ebene vorgenommen wird. Das Arbeiten mit Profilen kommt auch der Denkweise und Gewöhnung mancher Anwender geodätisch-photogrammetrischer Produkte entgegen.

Diese generierten Profile bestehen zunächst aus einer Reihe von Punkten, die mit einem zufälligen Fehler behaftet sind. Für diese Arbeit lagen Punktwolken vom Laserscanner LMS Z-420i der Firma Riegl zugrunde. Wie von BÖHLER & MARBS (2004) gezeigt, weisen Punkte in 20 m Entfernung ein Rauschen in Messrichtung von 11 mm auf. Untersuchungen von MULSOW et al. (2004) zeigen ein Messrauschen der Punkte von 7,5 mm bei einer Entfernung von 6 m. Eine Minimierung dieses Wertes erreicht man durch eine Glättung der Punkte. Bei geraden Profilen wird die Glättung durch eine ausgleichende Gerade, wie von LUHMANN (2000) vorgestellt, erzielt. Profile mit einer Krümmung werden über Kreisbogenstücke geglättet.

Aufgrund der Scanauflösung werden Kanten in der Regel nicht exakt getroffen. Werden sie dennoch getroffen, dann ist, bedingt durch die Strahldivergenz des Lasers bei innen liegen-

den Kanten, die Distanzmessung zu kurz, bei den außen liegenden Kanten dagegen zu lang. An den Kanten tritt ein Ausrundungseffekt auf (KERN 2003). In (BECKER 2004) werden Kanten durch Verschneiden von Oberflächen extrahiert. Betrachtet man den zweidimensionalen Fall, ist die tatsächliche Ecke durch einen Geradenschnitt bestimmbar.

2 Glättung extrahierter Profile

2.1 Kantenerhaltende Glättung

Bei der Glättung vorhandener Schnitte wird jeder Laserscannerpunkt einzeln betrachtet. Als Beobachtungen gehen die Nachbarpunkte des zu glättenden Punktes, die innerhalb eines bestimmten Bereiches (Patch) liegen, ein (Abb. 1a). Der zu glättende Punkt befindet sich im Patchmittelpunkt. Inwieweit ein Punkt einer Glättung unterzogen wird, ist abhängig von der Glättungstoleranz. Diese kann zum einen ein fest vorgegebener Wert sein, der sich beispielsweise nach der Messgenauigkeit des verwendeten Laserscanners richtet. Zum anderen ist eine variable Glättungstoleranz möglich. Ausgehend von den Verbesserungen aller Punkte wird eine Standardabweichung berechnet. Liegt die Verbesserung innerhalb der Glättungstoleranz, wird der Punkt geglättet, anderenfalls wird davon ausgegangen, dass dieser Punkt tatsächlich diese Abweichung aufweist.

Befindet sich ein Punkt in der Nähe einer Kante, so gehen Nachbarpunkte, die zu einer anderen Seite der Kante gehören, als Beobachtung mit ein und die ausgleichende Gerade wird verfälscht (Abb. 1b). Eine abgerundete Kante entsteht. Um dies zu umgehen, wird innerhalb der im Patch liegenden Punkte eine weitere Filterung durchgeführt. Durch den Punktmittelpunkt wird eine rotierende Gerade gelegt, die in Abhängigkeit von der Patchgröße in konstanten Winkelschritten rotiert. Für jede Geradenstellung werden die senkrechten Abstände der Punkte bestimmt und die Punkte, die innerhalb einer gewissen Toleranz d_{Tol} von der Gerade liegen, gezählt. Der Anstieg der Geraden, welcher die meisten Punkte innerhalb der Toleranz aufweist (Abb. 1c), ist der Näherungsanstieg der ausgleichenden Geraden. In der Ausgleichung werden dementsprechend nur die Punkte innerhalb der Toleranz verwendet.

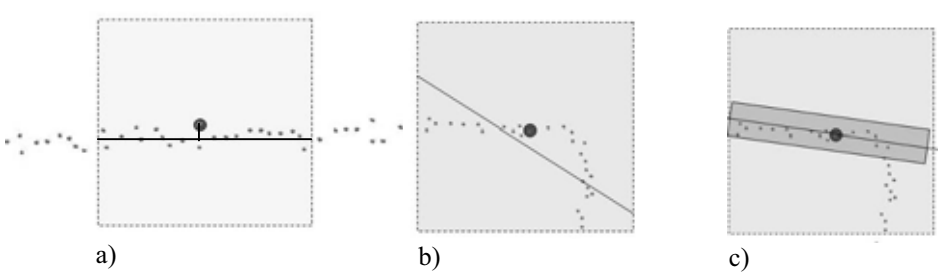


Abb. 1: a) Patch mit ausgleichender Gerade b) Lage der ausgleichenden Geraden in der Nähe einer Kante c) Stellung der rotierenden Geraden mit den meisten unkten im Toleranzbereich (Näherungsanstieg)

Eine Berechnung der Eckpunkte wird durch den Anstieg der ausgleichenden Geraden realisiert und im Anschluss an die Glättung durchgeführt. Tritt eine signifikante Änderung des Anstiegs auf, wird über einen Geradenschnitt der Schnittpunkt bestimmt. Zu jedem Punkt im Patch gehört ein Anstieg, der aus der jeweiligen ausgleichenden Geraden berechnet wurde. Die Schnittpunktberechnung wird pro Patch so oft durchgeführt, wie Punkte mit ihren jeweiligen Anstiegen vorhanden sind. Allerdings werden nur die Schnittpunkte verwendet, bei deren Berechnung eine Anstiegsdifferenz von mehr als 30° aufgetreten ist. Das arithmetische Mittel des mehrfach bestimmten Eckpunktes entspricht dem tatsächlichen Eckpunkt (Abb. 2 rechts). Über die verschiedenen Koordinatenpaare sind Standardabweichungen des vorliegenden Eckpunktes ableitbar, deren Größe deutlich unter der Einzelpunktgenauigkeit der Laserscannerdaten liegt.

$X_S = 3{,}828\ \text{m} \pm 1{,}24\ \text{mm}$

$Y_S = 2{,}347\ \text{m} \pm 1{,}19\ \text{mm}$

Abb. 2: Originalpunktwolke (links) und berechneter Schnittpunkt im glatten Profil (rechts) mit den Koordinaten $Xs \pm \sigma_X$ und $Ys \pm \sigma_Y$

2.2 Steuerparameter

Eine Optimierung des Glättungsprozesses wird durch das Setzen von Steuerparametern erreicht. Zu den Steuerparametern zählen:

- die Patchgröße p,
- die Glättungstoleranz d_{max} mit dem Faktor für den Vertrauensbereich,
- die Iterationen der Glättungsdurchgänge und
- die Toleranz d_{Tol} entlang der rotierenden Geraden.

Die Steuerparameter sind der Charakteristik des vorliegenden Profils und der verwendeten Scanauflösung anzupassen. Handelt es sich um überwiegend lange Geraden, ist eine große Patchgröße sinnvoll.

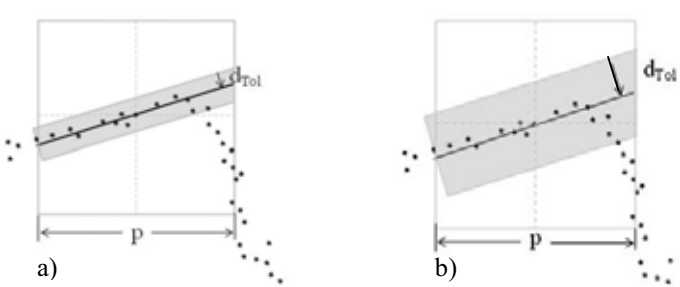


Abb. 3: a) Optimale Toleranzbreite d_{Tol} der rotierenden Geraden, b) zu große Toleranzbreite

Generell verstärken eine Vergrößerung des Patches und des Vertrauensbereiches sowie eine hohe Anzahl von Iterationen den Glättungsprozess. Um die kantenerhaltende Glättung nicht zu beeinflussen, darf die Toleranzbreite entlang der rotierenden Geraden nicht zu groß gewählt werden. Dies hätte zur Folge, dass die Glättung eines kantennahen Punktes von Punkten einer abgehenden Kante beeinflusst wird (Abb. 3). Ausgerundete Kanten sind die Folge. Grundsätzlich sollte die Toleranz nicht größer als das doppelte Messrauschen des Laserscanners sein.

2.3 Vektorisierung geglätteter Schnitte

Das Profil einer lückenlos aufgenommenen ebenen Oberfläche eines Objektes zeichnet sich bei der Vektorisierung durch ein geschlossenes Polygon aus. Ausgehend von den berechneten Eckpunkten und dem Wissen, dass sich bei einer geschlossenen Oberfläche in einem Eckpunkt jeweils zwei Vektoren schneiden, wird eine automatische Vektorisierung durchgeführt. Als Steuerparameter wird die längste vorhandene Profilstrecke vom Programm abgefragt. Dabei reicht eine Angabe auf Meter genau aus. Wann ein Eckpunkt mit einem weiteren verbunden wird, ist abhängig von der Anzahl der Punkte, die sich auf der Verbindungslinie befinden. Dabei werden Punkte, deren senkrechter Abstand von der Verbindungslinie kleiner als eine vorher definierte Toleranz ist, ebenfalls dazugezählt. Eine Unterbrechung in der Abfolge der Punkte, hervorgerufen durch Krümmungen (Abb. 4a links) oder Scanschatten (Abb. 4a rechts) entlang der Verbindungslinie ist ebenfalls ein Ausschlusskriterium für die Vektorisierung durch Geradenstücke.

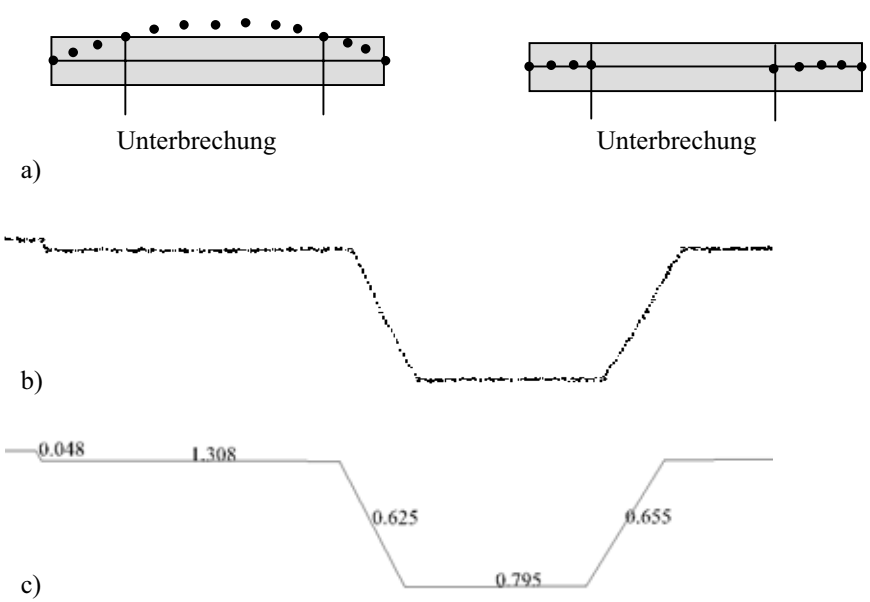


Abb. 4: a) Ausschlusskriterium bei der Vektorisierung (links: überhöhte Darstellung einer Krümmung im geglätteten Profil, rechts: Scanschatten), b) geglättetes Profil einer Fassade mit berechneten Eckpunkten (dicke Punkte), c) vektorisiertes Profil mit automatisch ermittelter Bemaßung

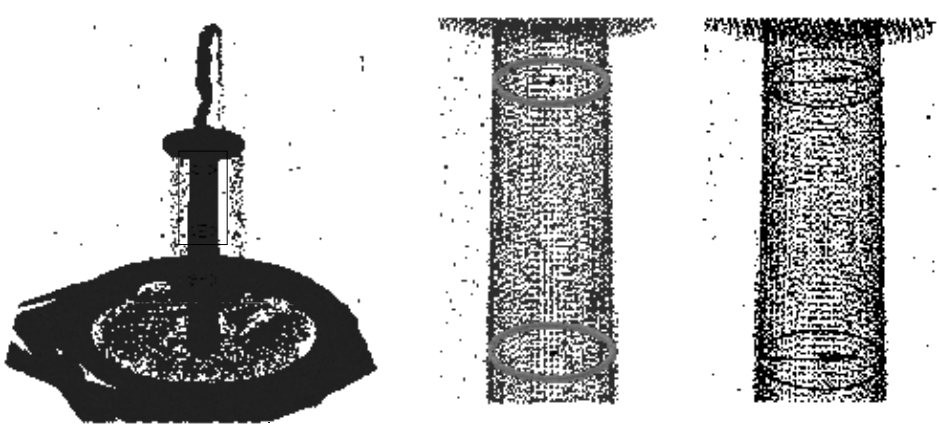
Mit größer werdender Toleranz werden Profilseiten vektorisiert, die von einem idealen Geradenverlauf abweichen. Betrachtet man vergleichend die Aufnahme eines Objektes mit dem Tachymeter, werden nur diskrete Punkte gemessen, welche die Objektgeometrie repräsentieren. Bei der manuellen Vektorisierung werden die aufgenommenen Punkte durch den Bearbeiter verbunden und kleine Unstetigkeiten im Profilverlauf generalisiert.

Eine krümmungsbasierte Vektorisierung ist bei der Glättung von Kreisen und Kreisbögen möglich. Zunächst wird der Schwerpunkt des Profils bestimmt und der Richtungswinkel vom Schwerpunkt zu jedem Messpunkt berechnet. Eine Sortierung der Punkte nach der Größe der Richtungswinkel ermöglicht das Verbinden benachbarter Punkte. Im Unterschied zu geraden Profilen werden alle geglätteten Punkte bei der Vektorisierung verwendet.

Eine automatische Beschriftung der Vektoren mit Maßen wie Radius, Mittelpunktkoordinaten und Längen der Profilseiten (Abb. 4c) ist ebenfalls möglich. Die Einbindung der so erzeugten Schnitte in eine CAD-Umgebung ist momentan über eine VRML-Datei gegeben.

3 Glättungsbeispiele

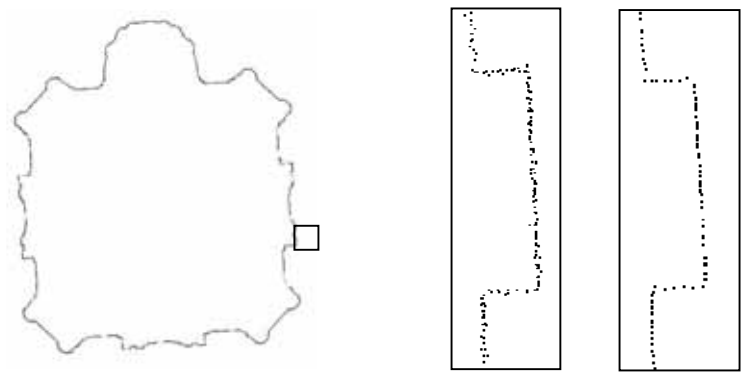
Abbildung 5a zeigt einen gescannten Brunnen als Beispiel für die krümmungsbasierte Glättung. In zwei verschiedenen Höhen wurden Horizontalschnitte extrahiert, welche geglättet wurden. In Abbildung 5b sind neben den geglätteten Punkten auch Punkte enthalten, die keiner Glättung unterzogen wurden, da ihre Verbesserungen außerhalb der Glättungstoleranz liegen. Da bei den Schnitten von vornherein eindeutig war, dass es sich um einen Kreis handelt, wurde die Patchgröße so gewählt, dass die Patchseiten größer als die Durchmesser sind. Somit werden zur Berechnung der ausgleichenden Kreisbögen alle Punkte herangezogen. Ein weiteres Endprodukt dieser Glättung sind, neben der Standardabweichung der Verbesserungen, die ausgeglichenen Koordinaten des Mittelpunktes und der ausgeglichene Radius. Die Standardabweichungen der zwei Kreisradien sind 6,9 mm und 7,4 mm.



a) b) c)

Abb. 5: a) Punktwolke eines Brunnens b) geglättete Profile bestehend aus Punkten c) vektorisierte Profile mit Radius

Als weiteres Beispiel wird im Folgenden die Anwendung der Glättung an der Dresdner Frauenkirche gezeigt. Die Frauenkirche hat eine Grundfläche von ca. 41 × 41 m. In der Höhe von 127 m über NHN wurde ein 4 cm breites Profil mit ca. 34.000 Punkten aus einem Laserscannerdatensatz extrahiert und geglättet. In Abbildung 6a ist das horizontale Profil zu sehen. In 6b) und 6c) sind Ausschnitte des ungeglätteten und geglätteten Profils abgebildet. Der Datensatz wurde aus drei Iterationen mit einer variablen Glättungstoleranz und einer Patchgröße von 20 cm generiert.



a) b) c)

Abb. 6: a) Horizontalschnitt der Frauenkirche, b) Ausschnitt der Originalpunkte, c) Punkte nach der Glättung

Ein weiteres Beispiel ist die Staumauer Rauschenbach/Sachsen (Abb. 7). Aus der Punktwolke wurde ein horizontaler und vertikaler Schnitt extrahiert. Mithilfe der Geradenglättung können Aussagen über die Genauigkeiten der horizontal und vertikal verlaufenden Punkte getroffen werden. Beide Schnitte wurden mit einer Patchgröße von 40 cm und einer Iteration geglättet. Das horizontale Profil besteht aus 752 Punkten und vertikal sind 227 Punkte vorhanden.

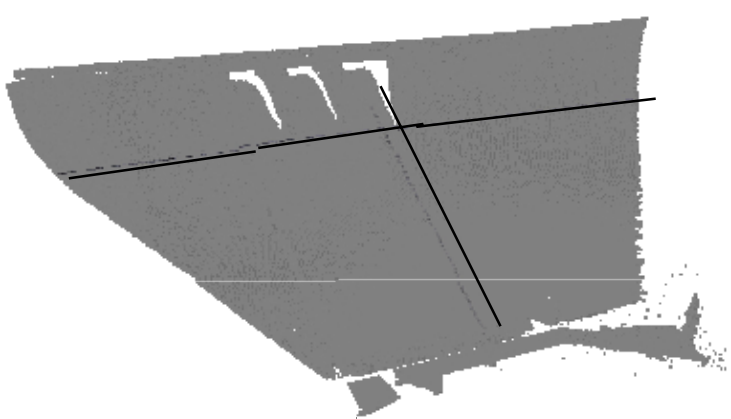


Abb. 7: Punktwolke der Gewichtsstaumauer Rauschenbach (Sachsen)

In den folgenden Tabellen sind die Mittelwerte der erreichten Verbesserungen und Standardabweichungen der Glättung im horizontalen und vertikalen Profil dargestellt. Im Mittel liegen die Verbesserungen der Punkte bei ±6,3 mm und ±2,1 mm, was unter der Genauigkeitsangabe des Herstellers des zur Aufnahme verwendeten Laserscanners liegt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Glättung im horizontalen Profil (Entfernung s der Profilpunkte vom Scanner 60 m < s < 90 m)

Horizontales Profil	Korrektur des Punktes P_i [mm]	m_0 der Ausgleichung [mm]
Mittel	6,3	14,9

Tabelle 2: Ergebnisse der Glättung im vertikalen Profil (Entfernung s der Profilpunkte vom Scanner 30 m < s < 70 m)

Vertikales Profil	Korrektur des Punktes P_i [mm]	m_0 der Ausgleichung [mm]
Mittel	2,1	1,9

4 Ausblick

Die im Beitrag gezeigten Verfahren ermöglichen die Glättung und Vektorisierung von aus Laserscannerpunktwolken extrahierten Profilen. Sie stellen damit ein wertvolles Werkzeug für die Verarbeitung von Laserscannerdaten dar. Zukünftige Arbeiten werden sich mit der Entwicklung intelligenter Verfahren zur Kombination von Geradensegmenten, Kreisstücken und unmodellierten Einzelpunkten zur Profildarstellung beschäftigen. Darüber hinaus können die entwickelten Verfahren auch auf die Glättung von Flächen und die Objektrepräsentation durch Flächenelemente erweitert werden.

5 Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde gefördert durch Mittel des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2000 – 2006 und Mittel des Freistaates Sachsen. Des Weiteren danke ich Nickolaus Studnicka (Firma Riegl) für die Bereitstellung der Laserscannerdaten der Dresdner Frauenkirche.

Literatur

Becker, R. (2005): *Differentialgeometrische Extraktion von 3D-Objektprimitiven aus terrestrischen Laserscannerdaten.* Geodätische Schriftenreihe der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Heft Nr. 63

Böhler, W. & A. Marbs (2004): *Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 82-89

Kern, F. (2003): *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Heft Nr. 19

Luhmann, T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Mulsow, C.; Schneider, D.; Ullrich, A. & N. Studnicka (2004): *Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 108-113

RIEGL Laser Measurement System GmbH (2006): *Long Range & High Accuracy 3D Terrestrial Laser Scanner System LMS-Z420.* http://www.riegl.com, 01/2006

Reale 3D-Modelle aus 4D-Punktwolken

Klaus ROHRBERG

Zusammenfassung

Mit der technischen Computertomographie steht ein Verfahren mit hoher Auflösung zur zerstörungsfreien Untersuchung verborgener Strukturen zur Verfügung. Da hierbei nicht Flächen, wie beim Scannen mit sichtbarem Licht, sondern der Raum durch Röntgenstrahlen erfasst wird, müssen die Methoden zur Flächenrückführung, Filterung und der Daten-Darstellung um eine Dimension erweitert werden. Da wir jedoch üblicherweise nur dreidimensional denken, muss das Ergebnis der CT vor der Darstellung wieder auf drei Dimensionen begrenzt werden. Es kann danach ein virtuelles oder mit dem 3D-Drucker ein reales Modell erstellt werden.

1 Definition der Begriffe

1.1 Reale 3D-Modelle

Räumliche Modelle, die man in die Hand nehmen kann. In diesem Artikel werden darunter auch virtuelle 3D-Modelle verstanden, die man auf dem Bildschirm ansehen, drehen, verschieben und durch die man auf dem Bildschirm navigieren kann.

1.2 4D-Punktwolken

Punkte, die nicht auf einer Oberfläche liegen, sondern einen Teilraum völlig überdecken und neben den xyz-Koordinaten eine weitere Variable enthalten, die die Zugehörigkeit des Punktes zu bestimmten Körpern beschreibt. Diese Art von Punktwolken entsteht bei Untersuchungen mit Computertomographen.

2 Ein kleine Übersicht

2.1 Photogrammetrie

Bei der Photogrammetrie werden Objekte aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen. Die Koordinaten einzelner Punkte, bevorzugt Konstruktionspunkte von einfachen geometrischen Elementen (Eckpunkte von Quadern, Recht- und Dreiecken, Endpunkten von Geraden), werden auf mindestens zwei Fotos markiert und dann die Koordinaten berechnet [8].

2.2 Scanner mit Punkt- oder Musterprojektion

Mit Linien, Punkten oder Mustern werden die Oberflächen markiert. Die dritte Raumkoordinate der Markierungen wird entweder durch Triangulation oder durch Entfernungsmessung ermittelt. Die Oberflächen werden so mit einem dichten Messpunktnetz belegt.

2.3 Computertomographie

Röntgenstrahlen sind in der Lage, Materie zu durchdringen. Durchleuchtet man Objekte aus vielen Richtungen, so lässt sich durch Zusammensetzen der Aufnahmen ein räumliches Abbild [3] des untersuchten Objektes ableiten. Als Ergebnis erhält man für jedes Volumenelement (Voxel) die xyz-Koordinaten und einen Absorptionswert.

3 Einzelheiten zu CT-Anlagen

3.1 Verschiedene Bauarten

Bei technischen Computertomographen wird das Untersuchungsobjekt auf einem absenkbaren Drehteller zwischen Strahlungsquelle und Detektor[1] angebracht. Als Detektoren kommen Flächen- oder Zeilendetektoren zum Einsatz. Bei der ersten Bauart ist die Messung nach einer vollen Drehung der Probe (360 bis 3600 Messungen) beendet. Bei Zeilendetektoren wird mit jeder Drehung nur eine Scheibe der Probe erfasst. Der Drehtisch wird dann um eine Scheibendicke abgesenkt und mit der Vermessung der nächsten Schicht fortgefahren. Geräte mit Zeilendetektoren sind für große Objekte (z. B. Motorblöcke) geeignet.

Da sich Patienten schlecht auf Drehtischen fixieren lassen, bewegen sich bei den medizinischen Computertomografen Strahlungsquelle und Detektor auf einer Kreisbahn um den liegenden Patienten. Das Prinzip ist aber gleich. Zur Einstellung der Schicht wird die Liege bewegt.

3.2 Bearbeitung von CT-Daten

Als Ergebnis einer CT-Aufnahme erhält man eine dreidimensionale Matrix: Sie bildet den Untersuchungsraum ab und enthält in jeder Zelle den Absorptionswert des entsprechenden Volumenelements. Die Größe eines Voxels entspricht der erzielten räumlichen Auflösung.

Um den Absorptionsbereichen die verschiedenen in der Probe vorkommenden Materialien zuordnen zu können, wird ein Histogramm erstellt, d. h. man trägt die Häufigkeit der Werte über der Grauwertskala auf. Je nach Beschaffenheit der Probe hat die Kurve des Histogramms mindestens zwei Maxima. Zu jedem Maximum gehört ein bestimmtes Material der Probe. Falls das Untersuchungsobjekt nur aus einem Material besteht, können die beiden Maxima der Luft und dem Probenmaterial zugewiesen werden.

Bei komplizierteren Proben werden die Grauwerte durch Farben ersetzt, da das menschliche Auge farbige Abstufungen wesentlich besser unterscheiden kann als reine Grauwerte. Parallel wird die Farbskala auch an der Grauwertskala des Histogramms angebracht. Vergleicht man nun die eingefärbte Punktmatrix in einer 3D-Darstellung, so fällt die Zuordnung der einzelnen Absorptionsmaxima zu den Materialien im Allgemeinen nicht mehr schwer. Als weitere Hilfe kann man die Anzeige auf Punkte einschränken, deren Grauwerte in der Umgebung eines Maximums liegen. Die Konturen und das zugehörige Material treten nun in der Abbildung klar hervor.

---

[1] Weitere Abbildungen zum Text siehe Vortragsfolien auf der dem Buch beigelegten CD

Danach wird die Breite des Filters so erweitert, dass genügend Punkte für die Vermaschung zur Verfügung stehen. Wird die Filterbreite zu groß gewählt, so erfasst man auch Punkte, die nicht zu dem interessierenden Material gehören. Hat man bei zu schmalen Filtern zu wenig Punkte, so treten bei der Vermaschung vermehrt Löcher auf. Beides ist unerwünscht, da die überschüssigen Punkte später mühselig entfernt und Löcher vor der Weiterverarbeitung von Hand geschlossen werden müssen.

4 Verarbeitung von Punktwolken

4.1 Darstellung als Punktwolke

Punkte haben mathematisch gesehen keine Ausdehnung und sind damit unsichtbar. Zum Betrachten auf dem Bildschirm wird ein kleiner Trick angewandt: jeder Punkt wird in einer Mindestgröße von einem Pixel oder mehr dargestellt. Wird den einzelnen Punkten zudem noch der ursprüngliche Farbton mitgegeben, hinterlassen sie auf dem Bildschirm recht gute räumliche Eindrücke.

4.2 Flächen aus Punktwolken

Enthält die Punktwolke einfache Strukturen wie Ebenen, Zylinder, Kegel usw., so sind die Parameter dieser Flächen aus der Punktwolke als Bestfit-Flächen leicht zu ermitteln. Sie enden dort, wo die Punkte eine vorgegebene Abweichung von der eingepassten Fläche überschreiten.

Unregelmäßige Freiformflächen können nicht auf diese Weise behandelt werden. Sie sind aus einzelnen kleinen Teilflächen zusammenzusetzen. Diese Teilflächen lassen sich mit dem Delaunay Algorithmus [10] so aus der Punktwolke konstruieren, dass jeweils drei benachbarte Punkte eine Dreiecksfläche bilden. Flächen haben keine Dicke und somit auch kein Volumen.

4.3 Körper aus Flächen

Werden Flächen so zusammengesetzt, dass sie nahtlos miteinander verschweißt sind und die Gesamtfläche in sich geschlossen ist (sie hat keinen Rand, dort befindet sich ja die nächste Teilfläche), so ist ein wasserdichtes Volumen entstanden. Wasserdicht bedeutet, dass auch die Teilflächen keine Löcher haben, durch die „Wasser“ vom Inneren nach außen gelangen kann. Der so gebildete Körper selbst kann aber sehr wohl Gänge und Hohlräume enthalten (z. B. Schweizerkäse).

4.4 Punktwolken aus CT-Daten

Wie oben erwähnt haben CT-Daten eine eigene Struktur. Die Messpunkte liegen nicht auf der Oberfläche des untersuchten Teils, sondern füllen das gesamte Arbeitsvolumen gleichmäßig aus. Verbinden der benachbarten Punkte würde nicht zu einer Fläche, sondern zu Dreiecken mit unzulässigen Strukturen führen, die den gesamten Arbeitsraum ausfüllen. Da für eine reale Darstellung aber auch hier wasserdichte Körper benötigt werden, ist ein anderes Vorgehen notwendig. Dies soll anhand eines Beispiels aus der Paläontologie entwickelt werden.

4.5 Vom virtuellen Körper zum realen 3D-Modell

Körper lassen sich in dünne Scheiben schneiden. Jeder Schnitt ist ein Profil des Volumens in der Schnitthöhe. Wählt man den Abstand der Schnitte so, dass er der Dicke einer Druckschicht entspricht, so können die Schnittbilder nacheinander zum Drucker gesendet werden. Aus diesen Schnittprofilen baut er dann Schicht für Schicht das Modell auf.

5 Anwendungsbeispiel aus der Paläontologie

5.1 Gegebenheiten und Aufgabenstellung

Ein paläontologischer Fund enthält als Einschluss in Sandstein einen Reptilienschädel. Der Schädel kann nur teilweise freigelegt werden. Würde mehr freigelegt, bestünde die Gefahr, dass das Fundstück zerbricht. Die verdeckten Teile müssen durch Untersuchung in einem Computertomographen der Betrachtung zugänglich gemacht werden.

Abb. 1: In Sandstein eingeschlossenes Saurier-Fossil

Als Messergebnis erhält man eine Matrix aus Voxeln mit den zugehörigen Absorptionswerten. Es wird dann das Skelett freigestellt. Man löscht dazu alle nicht zum Skelett gehörenden Voxel. Als Löschkriterium dienen der Absorptionswert und die räumliche Lage. Nun können die auf der Oberfläche liegenden Voxel zu einer geschlossenen Fläche verbunden werden (Vermaschung). Ist die Fläche in sich geschlossen und fehlerfrei, so umschließt sie ein Volumen. Aus diesem lässt sich ein 3D-Modell erstellen.

Fehler in der Oberfläche können Löcher, verkehrte Orientierung von Teilen der Fläche, Verzweigungen oder Flächenberührungen sein. Der Körper ist erst dann eindeutig, wenn alle diese Fehler beseitigt sind.

5.2 Aufbereitung der Voxeldaten

Im Histogramm wird die Häufigkeitsverteilung über den Absorptionswerten aufgetragen. Die im vorliegenden Fall auftretenden Absorptionsmaxima (A – D) können den vier in der Probe vorkommenden Materialien zugeordnet werden.

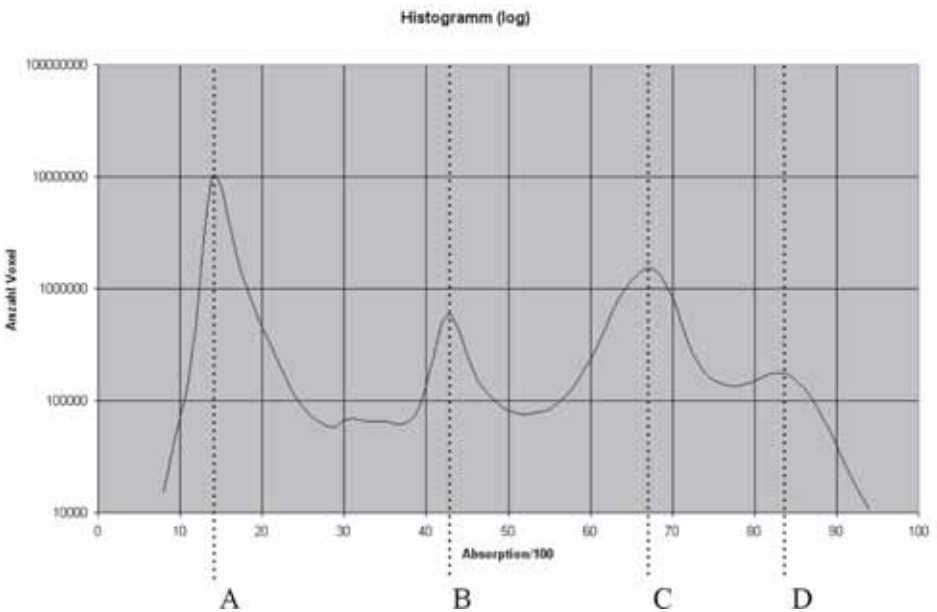


Abb. 2: Histogramm

Durch Vergleich der den Absorptionswerten zugewiesenen Grauwerte bzw. Farben im Histogramm mit der Farbdarstellung der Voxelwolke[2] ist diese Zuordnung leicht möglich.

Tabelle 1: Zuweisung der Materialien zu den Absorptionsmaxima im Histogramm

Maximum/Farbe	**Absorptionswert**	**Material**	**Volumen**
A / weiß	1450	Luft	27,6 cm^3
B / grün	4260	Sediment	2,7 cm^3
C / blau – magenta	6700	Sandstein	11,1 cm^3
D / rot – braun	8330	Skelett	1,6 cm^3

Beim nächsten Schritt werden nur die Voxel des interessierenden Materials selektiert.

[2] Farbige Abbildungen siehe Vortragsfolien auf der dem Buch beigelegten CD

5.3 Erzeugung von Flächen mit Polygonen

Modelle können nicht aus Punkt- oder Voxelwolken gefertigt werden. Dazu wird die Beschreibung eines Körpers benötigt. Körper wiederum lassen sich am einfachsten durch ihre Oberfläche beschreiben. Solche Flächen können gebildet werden, indem alle Punkte auf der Außenhaut mit ihren nächsten Nachbarn verbunden werden [1]. Es stehen dafür zwei Algorithmen zur Verfügung.

Die Flächentriangulation verbindet jeweils drei benachbarte Punkte zu Dreiecken. Um zu verhindern, dass nahe benachbarte Flächen miteinander verbunden werden, müssen bei diesem Verfahren Grenzwerte für den Maximalabstand zu verbindender Punkte und ein Maximalwinkel angegeben werden, den zwei benachbarte Dreiecke höchstens bilden dürfen. Bei richtiger Wahl der Maximalabstände und des Grenzwinkels erhält man gute Ergebnisse mit wenigen Fehlern.

Die Volumentriangulation bildet jeweils Tetraeder aus vier benachbarten Punkten, wenn deren Abstand geringer als der vorgegebene Grenzwert für den Punktabstand ist. Anschließend werden alle Tetraeder eliminiert, bei denen nicht mindestens ein Eckpunkt auf der Oberfläche liegt. Es entsteht eine dünne Schale.

5.4 Korrektur von Flächenfehlern

Bei der Flächenbildung treten Fehler der verschiedensten Art auf. In den Flächen entstehen Löcher, wenn benachbarte Dreiecke nicht nahtlos aneinander stoßen. Stimmen die Orientierungen einzelner Dreiecke nicht mit denen der Nachbarn überein, so ist die Fläche verdreht. Ein Fehler ist es auch, wenn mehr als zwei Dreiecke eine gemeinsame Kante haben oder mehr als drei Dreiecke einen gemeinsamen Eckpunkt. Ebenso verboten sind Strukturen, bei denen sich Flächen eines Körpers selbst schneiden.

Alle Fehler müssen bereinigt sein, ehe die Daten des Körpers an den Drucker übergeben werden. Versucht man fehlerhafte Daten zu übertragen, so erhält man unerwartete Druckergebnisse oder das Programm steigt im ungünstigsten Fall wegen unauflösbaren Widersprüchen aus.

5.5 Hilfsmittel für die Weiterverarbeitung

Da die Fundstücke meistens stark verformt sind, werden für eine Rekonstruktion des Originalzustandes weitere Bearbeitungsschritte erforderlich. Das mathematische Rüstzeug für homogene und inhomogene Skalierungen, Rotation und Scherung ist bekannt [2] [4] [5] [8] [9].

Bei Unstetigkeiten im Gestein wie Brüchen sind die einzelnen Gebiete zu trennen und Teil für Teil zu transformieren. Muss eine Krümmung des Raumes korrigiert werden, so empfiehlt es sich, die Flächen nicht durch eine Vielzahl von Einzelpunkten, sondern durch NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) zu beschreiben. Die Beschreibung durch NURBS beruht auf einer relativ kleinen Menge von Kontrollpunkten. Als kostenlose Dreingabe erhält man eine beachtliche Reduzierung der Datenmenge, globale und lokale Verformungen lassen sich mit geringem Aufwand bewerkstelligen.

6 Druck der 3D-Struktur

6.1 Aufbau der Schichten durch den 3D-Drucker

Beim 3D-Druck werden Schnitte durch das abzubildende Teil gelegt und jeder Schnitt als dünne Schicht auf die vorhergehende Schicht aufgebracht. Beim vorgestellten Drucker wird als Material ein gipsartiges Pulver verwendet. Auf eine neue Schicht wird mit InkJet Druckköpfen flüssiger Binder entsprechend dem aktuellen Schnittbild aufgebracht. Wo Flüssigkeit aufgebracht wurde, bindet das Pulver ab und wird hart.

Abb. 3: 3D-Drucker Z406

Der Druck läuft in folgenden Arbeitsschritten ab: Aus dem Vorratsbehälter (links) wird Pulver bereitgestellt. Der Transportschlitten verteilt es als dünne Pulverschicht auf die Arbeitsbühne (rechts). Die Arbeitsbühne wird um eine Schichtdicke (ca. 0,1 mm) abgesenkt und die Druckköpfe (am Transportschlitten) übertragen das Schnittbild auf die Pulverschicht. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis der gesamte Körper gedruckt ist. Er befindet sich dann von überschüssigem Pulver umgeben im Arbeitsraum auf der abgesenkten Arbeitsbühne. Man gibt etwa ein bis zwei Stunden Zeit, dass der Binder abbinden kann.

6.2 Nachbehandlung

Nach dem Abbinden wird das Teil dem Arbeitsraum entnommen und übriges Pulver entfernt. Im Ofen wird es dann zwei bis vier Stunden lang bei 40 °C getrocknet.

Das verbleibende Gebilde ist porös und zerbrechlich. Die Stabilität erreicht man durch Infiltrieren mit 2-Komponenten Harz und anschließendem Aushärten bei 70 °C. Jetzt ist die Oberfläche bereit zur Abschlussbehandlung, Fillern, Schleifen und Lackierung.

7 Ausblick

Computertomographen mit Flächendetektoren erlauben schnelle und damit preisgünstige Untersuchungen von kleineren Objekten. Auf CT-Geräten mit Zeilendetektoren und höheren Beschleunigungsspannungen können heute schon Objekte in der Größe von Motorblöcken untersucht werden. Die anfallenden Datenmengen sind extrem groß.

Es wird eine interessante Aufgabe sein, effektive Algorithmen zur Datenreduktion für den Sonderfall CT-Daten zu entwickeln. Ein möglicher Weg wurde durch das manuelle Vorgehen aufgezeigt:

Zur Rationalisierung des Prozesses bedarf es weiterer Unterstützung durch Programme. Die erforderlichen Algorithmen stehen größtenteils zur Verfügung und sind veröffentlicht [4]. Sie müssen noch in an den Prozess angepasste Programme umgesetzt werden. Als Stichworte sind zu nennen: Datenglättung [6] – Gradientenbildung – Datenreduktion durch Übergang auf Hyperflächen [7].

Der Spezialfall Paläontologie erfordert darüber hinaus noch weitere Verfahren zur nicht linearen Entzerrung von Verformungen, die bei der Ablagerung, der Versteinerung und den Schichtfaltungen aufgetreten sind. Dafür wird sich aber kaum ein geschlossener Algorithmus finden lassen, da die Verformungen zum Teil nicht stetig sind (Brüche, Risse usw.). Sie lassen sich wohl auch in Zukunft nur im Dialog mit dem Fachmann korrigieren.

Literatur

[1] Bringmann, O. & T. Pfliegner (2005): *Punktwolken interpretieren.* In*:* Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 258-265

[2] Dirschmid, H.-J. (1998): *Matrizen und Lineare Gleichungen.* Manz Verlag Wien

[3] Erben, S. (2005): *Industrielle Anwendungen hochauflösender Computertomographie* 10. Anwenderforum RPD&M, Fraunhofer Gesellschaft. IPA, 28.9.2005, Stuttgart

[4] Hoschek, J (1992): *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung.* 2. Auflage. B. G. Teubner Stuttgart

[5] [4], Seite 1-33, Transformation räumlicher Objekte, Projektionen

[6] [4], Seite 369 ff., Scattered Data Interpolation

[7] [4], Seite 435 ff., Multivariate Darstellungen

[8] Luhmann, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie.* 2. überarbeitete Auflage. Herbert Wichmann Verlag Heidelberg

[9] [8], Seite 29-50, Koordinatentransformationen

[10] Sedgewick, R. (1993): *Algorithmen in C*. Dalaunay-Triangulation. Addison-Wesley. 1. Nachdruck. 457 ff.

Laserscanning

Anwendungsbeispiele

3D-Aufbau und Nutzung virtueller Welten im Anlagenbau

Wolfgang BECKER, Romy DIETRICH und Manja LEOPOLD

Zusammenfassung

Die imp GmbH beschäftigt sich seit längerer Zeit mit der 3D-Dokumentation von Industrieanlagen auf Basis von Laserscanningdaten, speziell in der Energiewirtschaft.

Wirtschaftlichkeit und Nutzen waren Motivation zur Innovation.

Warum sollte man funktionierende Prozesse in der 2D-Dokumentation ändern?

Nur wenn unter der Berücksichtigung einer Kostenreduktion neue, moderne aber bereits bewährte Technologien mit Zukunft einen Mehrnutzen mit neuen Möglichkeiten und damit einen Mehrwert zur Folge haben!

Es zeigte sich aus den Erfahrungen der imp GmbH aus den letzten Jahren schnell, dass bisherige Ergebnisse wirtschaftlich auf Basis von Punktwolken erreichbar– ja sogar effektiver und genauer erzielbar sind.

Warum sollte man also nicht den nächsten Schritt in Richtung 3D-virtuell-reality gehen?

Um Aufwände einer high-end-Dokumentation kennenzulernen und auch um im Anschluss daran sinnvolle Auswertungstiefen festzulegen, wurde in Zusammenarbeit der imp GmbH mit der Hochschule Anhalt (FH) eine interessante Diplomarbeit zum Thema 3D-Modellierung und Visualisierung erstellt

Abb. 1: Ergebnis der 3D-Modellierung

1 Einleitung

Im Rahmen der Diplomarbeit der mittlerweile imp-Mitarbeiterinnen Frau Romy Dietrich und Frau Manja Leopold war eine Umspannanlage mithilfe des Laserscanners HDS3000 der Firma Leica Geosystems vollständig zu erfassen. Ergebnis sollte ein gerendertes 3D-Modell mit Echtfarbentexturen der Umspannanlage im Landeskoordinatensystem sein. Ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit war die Visualisierung des 3D-Modells.

Die Ausdehnung der Umspannanlage beträgt circa 70 × 90 m. Besonderheit sind die drei in Trafoboxen eingebauten Trafos, welche das Gelände in Schaltfeld und Grünfläche trennen. Des Weiteren befindet sich ein Gebäude auf dem Areal, in dem Schaltanlage, Eigenbedarfstrafo, Batterieraum, Warte sowie einige kleinere Nebenräume untergebracht sind.

2 Aufgabenstellung

1. Der erste Schritt war die Außen- und Innenaufnahme der Umspannanlage mittels Laserscanner und die Anbindung der Daten an das Landessystem. Die Genauigkeitsanforderung für das Gebäudeinnenaufmaß betrug 1–2 cm. Für die Genauigkeitsaussage war eine Vergleichsmessung mittels Tachymeter durchzuführen.
2. Die zweite Teilaufgabe beinhaltete die Transformation der Messdaten in das Landessystem und die Verknüpfung der Einzelscans zu einer Gesamtpunktwolke (mit Software Cyclone).
3. Die zentrale Aufgabe umfasste die 3D-Modellierung der Anlage. Im Zusammenhang mit der Erstellung des Modells war eine 3D-Bauteilbibliothek auf der Grundlage bestehender 2D-Symbolbibliotheken zu erzeugen.

Das Ergebnis war ein gerendertes 3D-Modell (MicroStation V8) mit wirklichkeitsnahen Echtfarbentexturen sowie die Präsentation der Umspannanlage mittels Video, Kamerafahrt und 3D-PDF.

3 Laserscanning

Für die Umsetzung der Aufgabenstellung wurde ein Festpunktfeld in der Umspannanlage geschaffen, welches die geforderte Genauigkeit garantiert. Dieses diente zur Verknüpfung der Punktwolken und zum Anschluss an das Landeskoordinatensystem.

Die Aufnahme der Umspannanlage erfolgte mit 53 Scannerstandpunkten. Dafür wurden vorübergehend 86 Zielmarken angebracht.

Der größte Fehler der Registrierung beträgt 1,3 cm, wobei die Beträge der Restklaffen im Mittel aller Standpunkte 3 mm nicht überschreiten. Das Endergebnis der Registrierung weicht im Mittel 3 mm von den Passpunkten ab. Damit liegt die Basis der Modellierung im unteren Viertel der vorgegeben Genauigkeit von 1–2 cm für das Gebäudeinnenaufmaß.

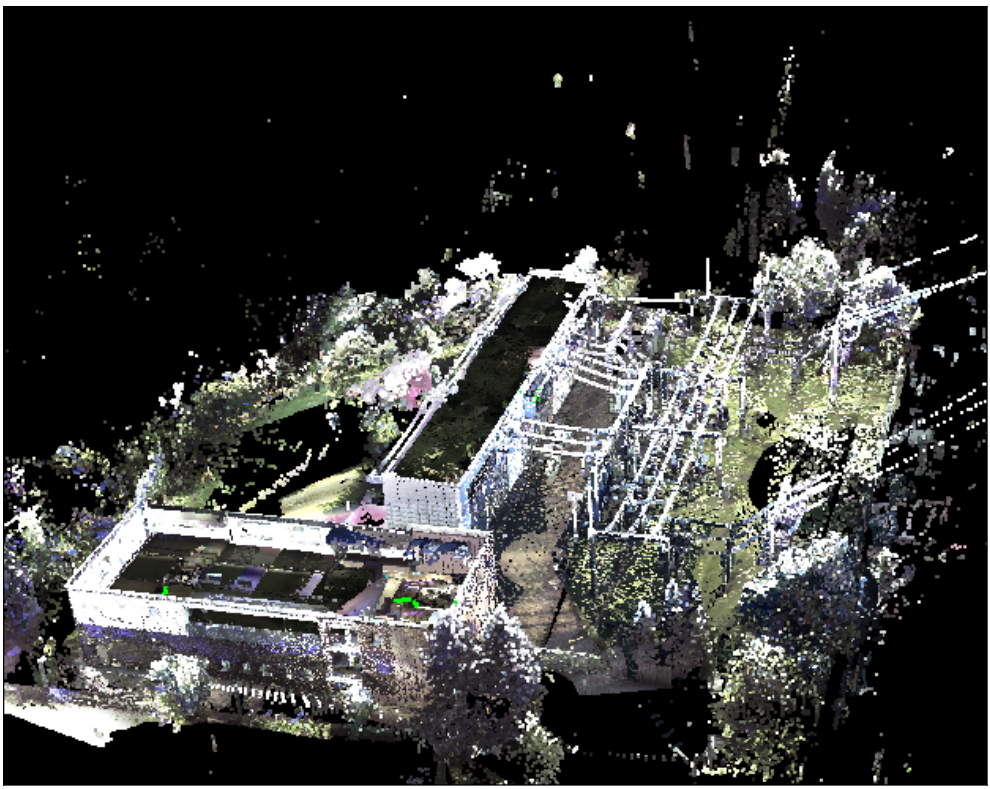


Abb. 2: Gesamtpunktwolke der Umspannanlage in Echtfarben

Um Aussagen über die Qualität des Laserscannings und der Modellierung sowie die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens treffen zu können, wurden tachymetrische Vergleichsmessungen durchgeführt.

4 3D-Modellierung

Ein 3D-Modell ermöglicht dem Betrachter, sich die Örtlichkeit leichter vorzustellen. Mittels Echtfarbentexturen kann diese Vorstellung noch verstärkt werden. Das erstellte Modell gestattet verschiedene Interaktionen sowie viele verschiedene Visualisierungs- und Präsentationsmöglichkeiten. Problemstellen komplexer Konstruktionen lassen sich besser darstellen und ermöglichen eine ingenieurmäßige Analyse.

Die Modellierung der Umspannanlage wurde im CAD-Programm MicroStation V8.1 mit der Applikation TerraScan durchgeführt.

TerraScan bietet eine komfortable Möglichkeit, Laserdaten einzulesen. Hierbei werden die Punkte nicht in die Zeichnungsdatei geschrieben, sondern zunächst im Arbeitsspeicher vorgehalten.

Nach der Verknüpfung der Einzelpunktwolken lag eine Gesamtpunktwolke mit fast 26 Millionen Punkten vor. Für die weiteren Arbeiten war es notwendig, die Punktwolke in Blöcke zu unterteilen. Die Einteilung der Blöcke erfolgte nach Bereichen, welche für eine separate Bearbeitung geeignet waren.

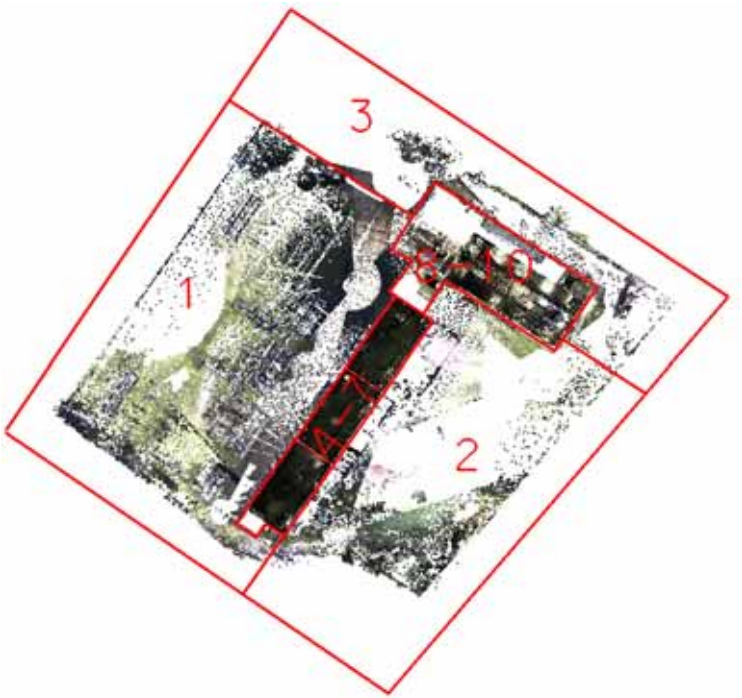


Abb. 3: Einteilung der Blöcke

Tabelle 1: Übersicht über die eingeteilten Blöcke

Block	**Bezeichnung**	**Anzahl der Punkte**
1	Schaltfeld	6.937.687 Punkte
2	Grünfläche	2.161.766 Punkte
3	Außenbereich	1.526.758 Punkte
4–7	Trafoboxen	9.797.462 Punkte
8–10	Hauptgebäude	11.120.376 Punkte

Im Zusammenhang mit der Erstellung des Modells wurden 3D-Bauteilbibliotheken erzeugt. Sie erleichterten die Modellierung und brachten einen nicht unerheblichen Zeitgewinn, da detailreiche Bauteile nicht mehrfach konstruiert werden mussten.

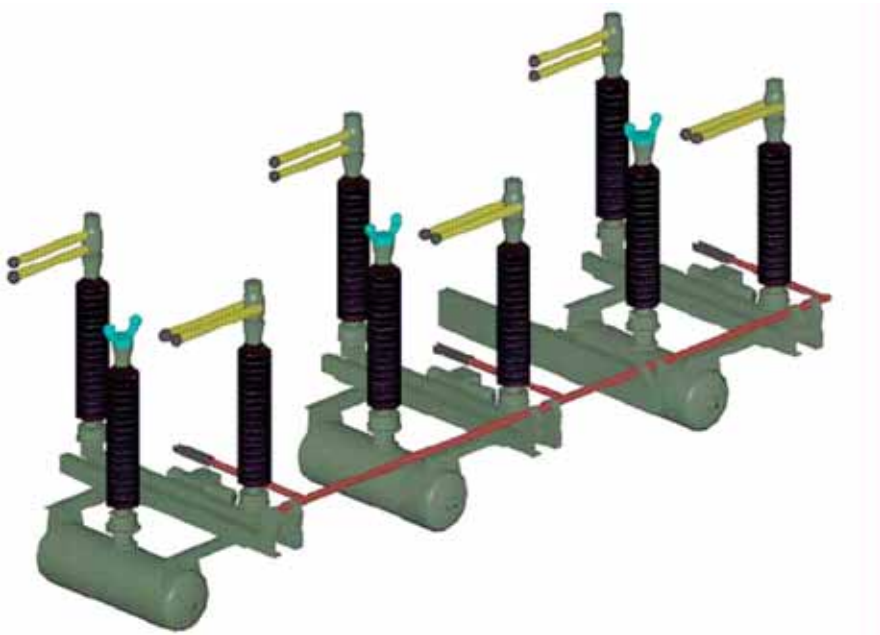


Abb. 4: Beispiel ist das 3D-Symbol des Drehtrenners im offenen Zustand

Der wirklichkeitsnahe Eindruck des 3D-Modells wird durch Echtfarbentexturen realisiert. Die während der Messung aufgenommenen Fotos dokumentieren die Örtlichkeit. Mittels Adobe Photoshop (Version 8.0.1) und Paint wurden diese Fotos bearbeitet und als Textur dem jeweiligen Objekt zugewiesen.

Die Untersuchung der Modellgenauigkeit ergab eine maximale Abweichung von 1,7 cm. Das arithmetische Mittel der Beträge der Differenzen ergibt 0,7 cm. Damit wird die in der Aufgabenstellung geforderte Genauigkeit von 1–2 cm eingehalten.

5 Visualisierung

Für die Präsentation dieses Modells wurden ein Film und ein 3D-PDF erstellt. Der Film beginnt mit dem Durchlaufen der Entstehungsphasen des Modells gefolgt von zwei Kamerafahrten. Die erste Fahrt simuliert einen Rundgang durch die Schaltanlage und die zweite lässt den Blick des Zuschauers über das Schaltfeld schweifen.

Eine weitere wirkungsvolle Visualisierungsvariante ist ein Adobe PDF-Dokument mit eingebettetem 3D-Modell. Ab der Version MicroStation V8 2004 Edition besteht die Möglichkeit, ein 3D-PDF auszugeben. Das ausgegebene Dokument kann im Adobe Reader 7.0 angezeigt werden. Diese Präsentationsart gestattet stufenloses Zoomen, Drehen und Verschieben des Modells. Außerdem bietet es verschiedene Interaktions- und Animationsmöglichkeiten.

6 Fazit

Einige Aufgaben können in ihrer Art nur mit der Laserscannertechnik wirtschaftlich bewältigt werden. Hierzu zählt die Aufnahme von Umspannanlagen. Komplexe Bauteile können mit dem Laserscanner detaillierter erfasst werden als mit herkömmlichen Verfahren. Ein weiterer Vorteil ist die in den Laserscanner integrierte Kamera, die zusätzlich die Örtlichkeit dokumentiert. Als besonders wirtschaftlich zeigte sich die Kombination zwischen Tachymeteraufnahme und Laserscanning.

Ein derart detailliertes Modell, wie es in dieser Diplomarbeit geschaffen wurde, ist wirtschaftlich nur auf der Basis von Laserdaten möglich. Die zugewiesenen Echtfarbentexturen erzeugten hierbei einen fotorealistischen Eindruck.

Mit einem 3D-Modell können komplexe Strukturen besser dargestellt werden. Es lassen sich Konstruktionsdaten extrahieren und ingenieurmäßig analysieren. Dies ist beispielsweise für geplante Umbaumaßnahmen vorteilhaft.

Literatur

Kern, F. (2003): *Automatische Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten.* Geodätische Schriftreihe Nr. 19, Dissertation TU Braunschweig

Luhmann, T. (Hrsg.) (2004): Photogrammetrie – Laserscannig – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Schulze, S. (2002): *Anwendung des 3D-Laser-Scanning für die Bestandsdokumentation im Anlagenbau.* Diplomarbeit, Hochschule Anhalt (FH), Fachbereich Vermessungswesen

Wiedemann, A. (2004): *Handbuch Bauwerksvermessung – Geodäsie – Photogrammetrie – Laserscanning.* Basel – Boston – Berlin; Birkhäuser Verlag

Konzept für eine As-Built-Aufnahme von Schiffsrümpfen

Johannes SOUMAGNE und Hans HEISTER

Zusammenfassung

In modernen Werften ist der Schiffbau ein Fertigungsprozess, bei dem Schiffssektionen aus immer größeren Einzelteilen zusammengefügt werden. Die Anwendung dieser Methode kann auch bei der Reparatur von Außenhautschäden oder sonstigen Nachrüstarbeiten an Schiffsrümpfen eingesetzt werden. Ein Problem hierbei ist, dass die zur Abwicklung von Reparaturaufträgen erforderlichen Daten über die Außenhautform in der Regel nicht vorhanden sind. Mit der Bereitstellung eines zuverlässigen 3D-Modells des Schiffsrumpfes als As-Built-Aufnahme kann die Außenhautform über Linienrisse abgeleitet und für die Herstellung von Bauteilen verwendet werden. Mit einer solchen Dokumentation sind Fertigungsprozesse optimierbar und führen insgesamt zu einer Mehrwertschöpfung, da die Dauer einer Schiffsreparatur verkürzt und somit die kostenintensive Ausfallzeit des Schiffes verringert wird.

1 Einleitung

Die Dr.-Ing. Wesemann Gesellschaft für Ingenieurgeodäsie mbH erfasste im Mai 2004 bei der Blohm+Voss Repair GmbH in Hamburg den Achterrumpf eines Fährschiffes mit einem Laserscanner in der Weise, dass die Rumpfform über eine Verknüpfung aller Scans modelliert werden konnte. Aus dem so erhaltenen 3D-Modell wurden in ausgewählten Spantenebenen Profile abgeleitet und als zweidimensionale Spantenrisse bereitgestellt.

Abb. 1: Eingedocktes Fährschiff

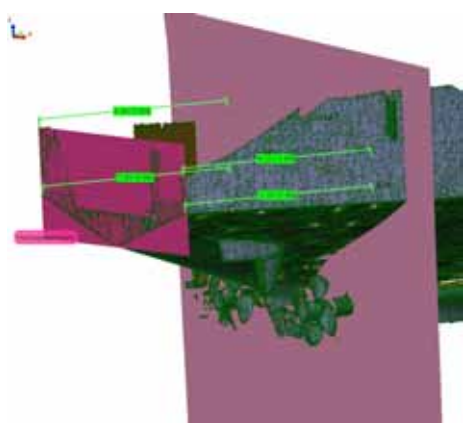


Abb. 2: Modelliertes Achterschiff

Da am Achterschiff jedoch kein Objektkoordinatensystem definiert und über Passpunkte tachymetrisch bestimmt wurde, konnten die Maßangaben in den hergestellten Spantenrissen nicht ins Schiffskoordinatensystem überführt werden. Es zeigte sich, dass die Daten einer As-Built-Aufnahme des Rumpfes im Schiffskoordinatensystem vorliegen müssen, um eine Grundlage für weitere Entscheidungsfindungen in Fertigungsprozessen bilden zu können.

2 Messverfahren und Messanordnungen

2.1 Tachymetrische Passpunktbestimmung

Zur Überprüfung des Aufwandes im Hinblick auf tachymetrische Passpunktbestimmungen an Schiffsrümpfen und den Gegebenheiten in Schwimmdocks führte Wesemann im Oktober 2004 eine Testmessung durch. Hierbei wurde im Dock eine Netzkonfiguration gewählt, die ein Schiff umschließt und im Bug- und Heckbereich Diagonalvierecke aufweist. Die Verknüpfung der Netzpunkte erfolgte durch Richtungs- und Distanzmessungen. Dabei traten folgende Beeinträchtigungen auf:

- Keine stabilen Instrumentenstandpunkte auf der Stahlbeplattung des Schwimmdocks
- Aufwändiges Horizontieren und Zentrieren der Stehachse über den Bodenpunkten aufgrund der leichten, rhythmischen Auf- und Abwärtsbewegung des Docks
- Verkippen der Stehachse durch Fahrzeugbewegungen in unmittelbarer Nähe der Instrumentenstandpunkte
- Verzögerte Registrierung der Messelemente trotz ausgeschalteter Kompensationseinrichtung.

Da die Instrumentenstandpunkte aufgrund der oben näher beschriebenen Umstände während der Messung instabil waren und um ihre Lotrichtung schwankten, lagen für jeden Standpunkt veränderliche topozentrische Bezugssysteme vor. Diese Datumsänderungen hatten zur Folge, dass die Messergebnisse nicht den gewünschten Genauigkeitsanforderungen entsprachen.

2.2 Vorschlag für eine neue Messanordnung

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München wurde deshalb ein neues vermessungstechnisches Konzept erstellt, welches mithilfe von Theodolit-Messsystemen präzise dreidimensionale Koordinatenbestimmungen von Schiffshauptpunkten unter den zuvor genannten Erschwernissen ermöglicht. Ein wesentlicher Vorteil des Vorschlages besteht darin, dass die Instrumentenaufstellungen nicht lotbezogen sind und erforderliche Netzpunkte sowie sonstige Targets für eine spätere Überführung ins Schiffskoordinatensystem zuverlässig eingemessen werden können. Die Bestimmung dieser Punkte kann in einem am Schiff zu definierenden Bezugssystem in nachfolgend beschriebener Messanordnung erfolgen:

- Aufbau eines Stationsnetzes um das Schiff herum aus nicht lotbezogenen Instrumentenaufstellungen

- Materielle Festlegung eines Bezugssystems (Dockkoordinatensystem) durch Festlegung der Schiffshauptpunkte
- Signalisieren von Netzpunkten und Targets
- Einmessen in nicht lotbezogenen örtlichen Bezugssystemen, festgelegt durch freie Orientierung beliebiger Instrumentenaufstellungen
- Verknüpfen aller gemessenen Punkte durch eine gemeinsame Ausgleichung im Dockkoordinatensystem nach vermittelnden Beobachtungen
- Überprüfen und Analysieren erreichter Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaße

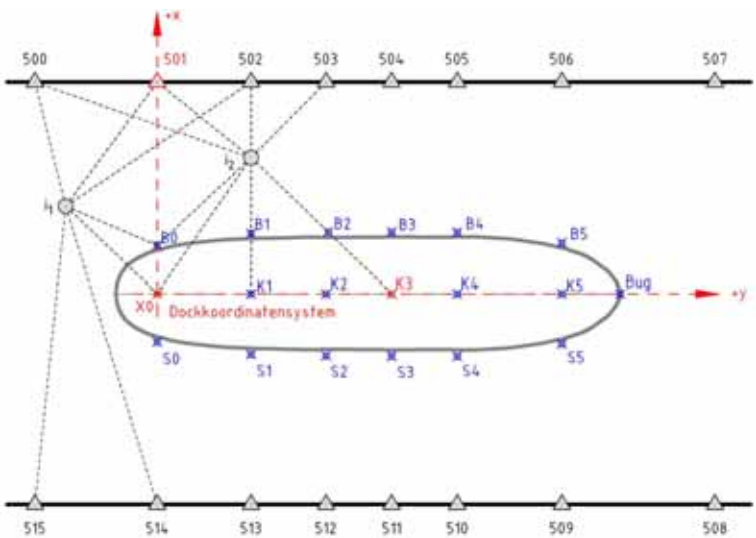


Abb. 3: Nicht lotbezogene Orientierungsmessungen im Dockkoordinatensystem

Die berechneten Koordinaten beziehen sich zunächst noch auf das für die Orientierungsmessungen gewählte Dockkoordinatensystem. Über eine ausreichende Anzahl von Passpunkten, ihrer Zuordnung im Schiffskoordinatensystem und den daraus abgeleiteten Sollkoordinaten kann in der nachfolgenden Auswertung dann eine räumliche Koordinatentransformation aller weiteren Schiffspunkte in das Schiffskoordinatensystem durchgeführt werden.

2.3 Ziele einer neuen Messanordnung

Der Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus gibt entsprechend den Erfahrungen der deutschen Werften zum gegenwärtigen Zeitpunkt Verarbeitungsgenauigkeiten an. Bei den hierin genannten Abweichungen vom Sollmaß handelt es sich um Obergrenzen, die so festgelegt wurden, dass weder die Funktion noch die Festigkeit noch die Qualität des Schiffes beeinträchtigt wird.

Da es keine Messmethode ohne Messabweichungen gibt, muss das Mess- und Auswerteverfahren so gewählt werden, dass systematische Messabweichungen die Messungen von

Istmaßen nicht über das geforderte Genauigkeitsmaß verfälschen. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen ist insbesondere darauf zu achten, dass systematische Messabweichungen möglichst minimiert werden und auf das Messergebnis nur geringen Einfluss haben. Die bei einer Messanordnung zu erwartenden zufälligen und systematischen Messabweichungen führen zusammen zum quantitativen Qualitätsmaß der „Messunsicherheit".

Unter Berücksichtigung der Erschwernisse bei Messungen in Schwimmdocks und zeitgleichen schiffbaulichen Gegebenheiten muss eine noch durchzuführende Analyse und Erprobung von Messanordnungen zeigen, dass folgende Ziele erreicht werden können:

- Einhalten einer Messunsicherheit u < 5 mm
- Gewährung einer Formgarantie des erfassten Schiffsrumpfes
- Weltweite und anpassungsfähige Einsatzmöglichkeit des Mess- und Auswertesystems

2.4 Erfassen einer Rumpfform mittels Laserscanning

Ein wesentliches Merkmal des Laserscannings ist die schnelle Erfassung einer Rumpfform mit hoher Punktdichte. Aufgrund der Schiffsgrößen müssen mehrere Laserstandpunkte so ausgewählt werden, dass die erzeugten Einzelscans die gesamte Rumpfform erfassen und keine Abschattungen gegeben sind.

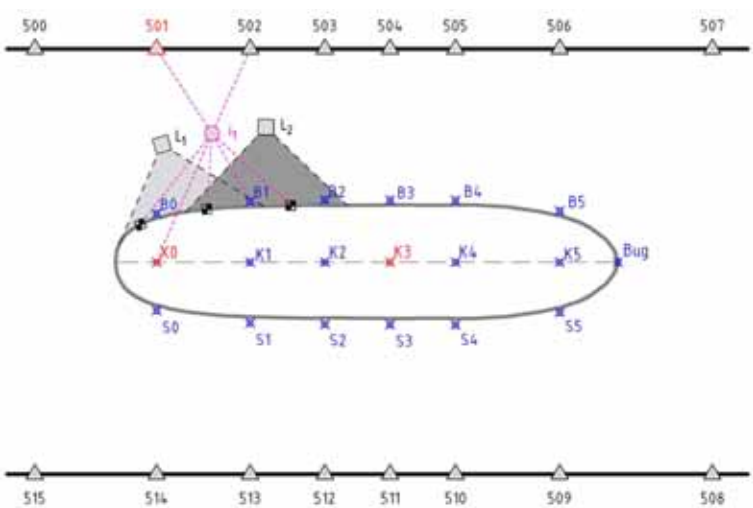


Abb. 4: Erfassen einer Rumpfform mittels Laserscanning

Zur zuverlässigen Verknüpfung dieser Einzelscans sind weitere Targets als identische Punkte notwendig, wobei diese in ausreichender Anzahl und unterschiedlichen Höhen am Rumpf angebracht werden müssen. Diese Targets werden vorab oder auch zeitgleich mit den Scans durch ebenfalls nicht lotbezogene Instrumentenaufstellungen bestimmt. Somit können alle Einzelscans (Punktwolken) eindeutig identifiziert und durch eine zuverlässige Registrierung in das definierte Dockkoordinatensystem überführt werden.

2.5 Auswerten der Messergebnisse

Mithilfe einer geeigneten Auswertesoftware werden die Punktwolken über die Passpunkte und Targets miteinander verknüpft, sodass alle gescannten Objektpunkte im Dockkoordinatensystem vorliegen und die Punktwolke die Rumpfform darstellt. Ebenfalls erfasste Ausrüstungskomponenten, wie z. B. Schiffsschrauben, Wellenhosen, Wellenböcke etc. werden vor einer Weiterverarbeitung gelöscht. Die eigentliche Modellierung der Rumpfform erfolgt über eine Vermaschung aller gescannten Punkte, wobei über einen Systemfilter das systematische Rauschen der Scandaten gefiltert wird und somit die erhaltene Flächenform des Vielflächners geglättet ist. Das Ziel dieser Vermaschung ist, den Vielflächner an die tatsächlich vorhandene Form der Oberfläche bestmöglich zu approximieren.

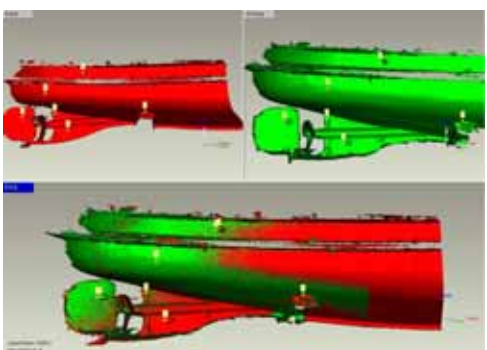


Abb. 5: Verknüpfung von Einzelscans

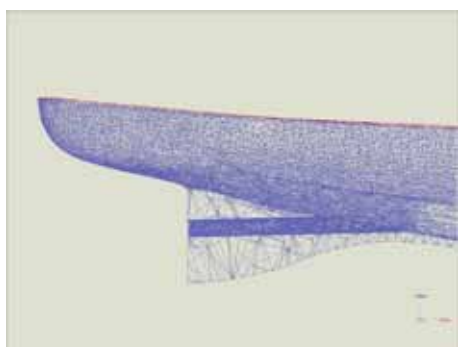


Abb. 6: Vermaschung aller gescannter Punkte

Im modellierten Schiffsmodell kann nun mit schiffbaulichem Sachverstand die Mitschiffsebene im Dockkoordinatensystem rekonstruiert und lagemäßig überprüft werden. Danach ist dann über geeignete Passpunkte der Schiffskonstruktion die Transformation des gesamten digitalen Schiffsmodells ins Schiffskoordinatensystem für alle weiteren Bearbeitungsschritte möglich. Nach eventuell erforderlichen Korrekturen können abschließend alle Spantenebenen wiederum über Passpunkte und die bekannten Spantenabstände konstruiert werden.

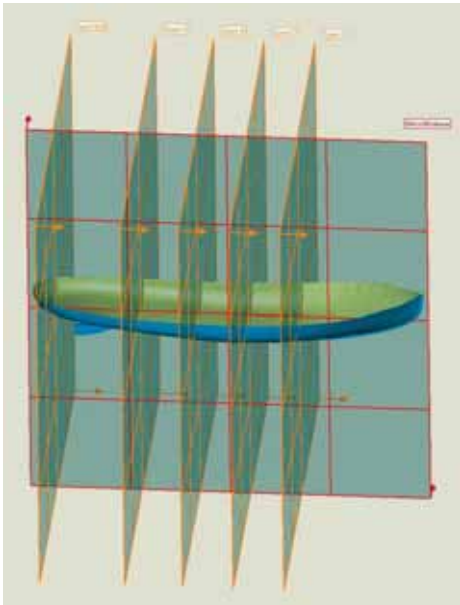


Abb. 7: Rekonstruktion der Mittschiffsebene und ausgewählter Spantenebenen

2.6 Herstellen von Spantenrissen

Der nun ins Schiffskoordinatensystem überführte modellierte Schiffsrumpf kann dann als 3D-Spantenmodell in entsprechenden Formaten für AutoCAD, MicroStation und auch IGES (Initial Graphics Exchange Specification) zur Übernahme in ein CAD oder spezielle Schiffsbauprogramme, wie z. B. NAPA oder MultiSurf ,bereitgestellt werden.

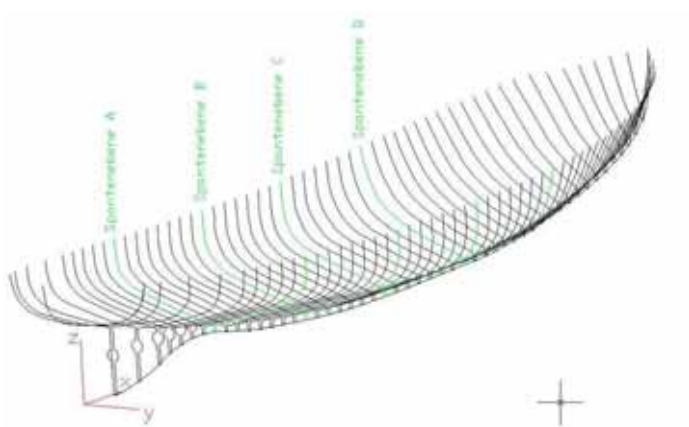


Abb. 8: 3D-Spantenmodell

Bei einer Übernahme ist insbesondere darauf zu achten, dass die Interoperabilität zwischen den jeweiligen Programmen gegeben ist und es nicht aufgrund intern verwendeter Algorithmen zu Verfälschungen von Ergebnissen kommt.

Im CAD können aus dem Spantenmodell zweidimensionale Spantenrisse abgeleitet und je nach Anforderungsprofil aufbereitet werden. Die Kurvenverläufe in diesen Rissen stellen nun die tatsächliche Form der Außenhaut dar und sind somit Grundlage für weitere Planungs- und Fertigungsaufgaben.

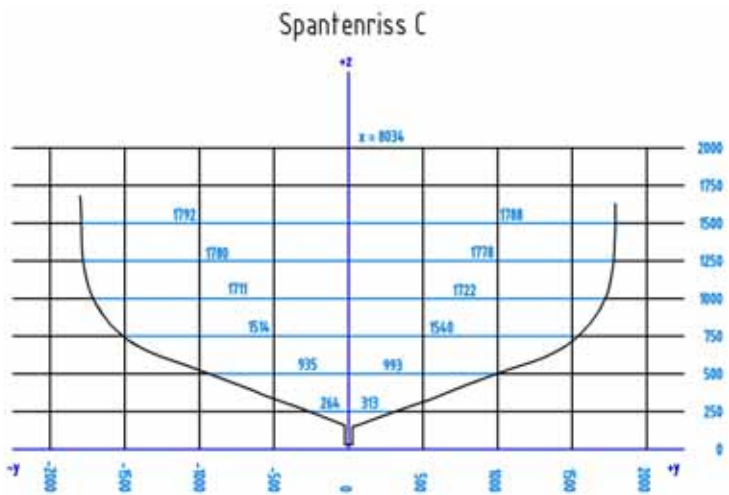


Abb. 9: Kurvenverlauf der Außenhaut in einer Spantenebene

3 Fazit und Ausblick

Mit der Bereitstellung eines zuverlässigen 3D-Modells des Schiffsrumpfes als As-Built-Aufnahme kann ein Soll-Ist-Vergleich mit den vorliegenden Konstruktionsdaten sowohl direkt im CAD erfolgen oder auch anhand von Planunterlagen tabellarisch und grafisch dargestellt werden. Somit sind zulässige Abweichungen und einzuhaltende Toleranzwerte überprüfbar, sodass die dabei gewonnenen Erkenntnisse bei Produktionsprozessen berücksichtigt werden können. Aber auch während der Fertigung von Einzelteilen und der Reparatur selbst wäre mit dem vorgestellten Messverfahren, den Instrumenten und Auswertesystemen ebenso feststellbar, ob vorgegebene Toleranzen überschritten werden und ob ein Bauteil vor einer Weiterverarbeitung nachgebessert werden muss. Durch eine solche Dokumentation eines Montagevorgangs könnten Fehlertrends und Fehlerursachen leichter erkannt und frühzeitig korrigiert werden. Zu Überprüfen bleibt aber, ob die gestellten Genauigkeitsanforderungen mit dem zur Verfügung stehenden Instrumentarium und der vorgestellten Messanordnung erreicht werden können und vom wirtschaftlichen Standpunkt aus vertretbar sind.

Literatur

Deumlich, F. & R. Staiger (2002): *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik.* Hermann Wichmann Verlag, Heidelberg. 403-406

Eyres, D.J. (2001): *Ship Construction*, *Fifth Edition.* Elsevier Butterworth-Heinemann Verlag, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP

Holtermann, J. (2001): *Anwendung moderner Fertigungsmethoden bei der Reparatur von Außenhautschäden.* Veröffentlichte Diplomarbeit im Studiengang Schiffbau der Technischen Universität Hamburg Harburg. 4-20

Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (1998): *Schiffstechnik und Schiffbautechnologie*, Seehafenverlag, Hamburg. 78-118

Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (2003): *Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus*, Hamburg

Laserscanning und Photogrammetrie – die Vielfalt der Auswertemöglichkeiten

Ralf BECKER

Zusammenfassung

Die Nachfrage nach digitalen Daten in Planungs- und Dokumentationssystemen ist ungebrochen. Die Objekte der realen Welt müssen hierzu erfasst und in die Modelle der digitalen Systeme überführt werden. Zur Erfassung von Massendaten steht heute neben der klassischen Photogrammetrie das terrestrische Laserscanning zur Verfügung. Methoden zur gleichzeitigen und kombinierten Verwendung beider erfasster Datentypen sowie Anwendungen werden vorgestellt.

1 Einleitung

Früher wie heute werden zu Planungs- und Dokumentationszwecken die Daten der realen Welt in Modellen benötigt. Sie wurden zuvor in analoger Form meist zweidimensional z. B. auf Papier als Zeichenträger abgebildet. Dreidimensionale Modellierungen mit analogen Modellen kamen eher selten vor. Mit der Einführung leistungsfähiger, dreidimensional arbeitender CAD-Systeme hat auch die Modellierung in drei Dimensionen auf der Grundlage von Messdaten bestehender Objekte der realen Welt in das Vermessungswesen Einzug gehalten.

Die Modelle der CAD-Systeme basieren auf möglichst einfachen geometrischen Primitiven wie Ebenen und Zylindern. Diese gilt es aus der zur Verfügung stehenden Messdatenmenge zu extrahieren.

2 Aufnahmesystem

Zur Generierung der Messdaten hat das Vermessungswesen unterschiedliche Messmethoden vom Handaufmaß über die Tachymetrie und die Photogrammetrie bis hin zum Laserscanning entwickelt. Während beim Handaufmaß und bei der Tachymetrie einzelne Punkte des Objekts erfasst werden, wird das Objekt bei der Photogrammetrie und beim Laserscanning flächendeckend in der – soweit gerätetechnisch möglich – gewünschten Auflösung durch eine Vielzahl von Punkten erfasst. Während bei der photogrammetrischen Aufnahme alle Bildsensoren gleichzeitig belichtet werden, arbeitet der Laserscanner den Objektraum durch Einzelpunktmessungen sequentiell in schneller Folge in einer festgelegten Winkelschrittweite automatisch ab. Bei der photogrammetrischen Aufnahme entstehen zweidimensionale Bilder, sodass für die Ableitung der dritten Dimension ein zweites Bild desselben Objektpunktes – von einem anderen Standpunkt aus aufgemessen – benötigt wird. Das Laserscanningverfahren arbeitet nach dem Prinzip der Polaraufnahme mit der Messung von zwei Richtungen und einer Distanz, sodass alle Objektpunkte direkt in allen drei Dimensi-

onen definiert sind. Während den Bildpunkten die Farbinformation des Objekts beigegeben ist, fehlt diese den Scannerpunkten. Die bildliche Vorstellung des Auswerters vom Objekt ist deshalb allein mit der Scannerpunktwolke nur sehr schwer möglich. Durch die Automatismen der Aufnahme können den Einzelpunkten keine attributiven Informationen wie beim Handaufmaß und der Tachymetrie beigegeben werden. Die Attributierung kann erst im Modellierungsprozess erfolgen.

Die Aufnahmekonfiguration der Photogrammetrie bewirkt wegen der häufig vorkommenden schleifenden Schnitte der Bildstrahlen identischer Objektpunkte zweier Aufnahmen oftmals eine relativ schlechte Bestimmung des Abstandes zum Aufnahmestandpunkt. Die Auflösung rechtwinklig zur Aufnahmerichtung ist wesentlich besser. Beim Laserscanning ist die Auflösung senkrecht zur Messrichtung oftmals eher schlechter, da man sich wegen der sequentiellen Messmethodik unter Berücksichtigung der Aufnahmezeit auf eine bestimmte Schrittweite der Richtungsänderungen des Messstrahls beschränken muss. Die Entfernungsmessgenauigkeit der Laserscanner ist von der Entfernung weitgehend unabhängig. Die Genauigkeitsbeschränkungen der beiden Verfahren wirken also – wie auch Abbildung 1 wiedergibt – in unterschiedliche Richtungen.

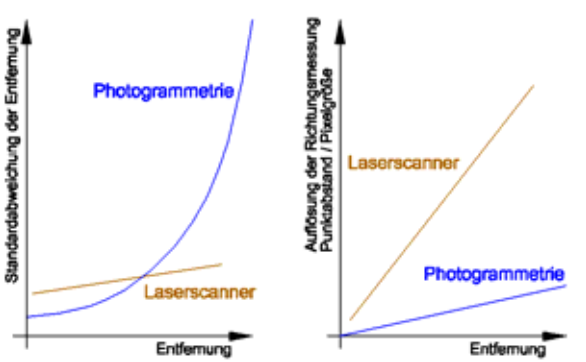


Abb. 1: Vergleich der Messverfahren

Abb. 2: Riegl-Scanner LMS-Z420i mit aufgesetzter Kamera Nikon D100

Die genannten Eigenschaften bzw. fehlenden Eigenschaften der beiden Messverfahren Photogrammetrie und Laserscanning legen es nahe, beide Aufnahmeverfahren miteinander zu verbinden, um die Vorteile beider Verfahren zu nutzen und Nachteile des jeweils anderen Verfahrens aufzufangen. Ein solches Aufnahmesystem bietet die Firma RIEGL in Form eines Laserscanners mit fest aufgesetzter hochauflösender photogrammetrischer Kamera an (Abb. 2).

3 Auswertesystem

Für die Visualisierung und Auswertung der beiden Datentypen ist ein System erforderlich, das Scanner- und Bilddaten in demselben Koordinatensystem superimpositiv darstellen kann. Das System PHIDIAS ist ein hierfür geeignetes System (Abb. 3). Die Transformation in das einheitliche Koordinatensystem erfolgt entweder bereits in der Scannersoftware oder kann alternativ für zusätzlich aufgenommene Bilder im System PHIDIAS durchgeführt werden. PHIDIAS, ein vollgültiges photogrammetrisches Auswertesystem, ist in den letzten Jahren intensiv um Funktionalitäten für Scannerdaten erweitert worden. PHIDIAS basiert auf dem CAD-System MicroStation, sodass gleichzeitig alle Funktionalitäten dieses Systems bei der Modellierung der Objekte genutzt werden können (Abb. 4).

Abb. 3: Visualisierung von Scanner- und Bilddaten in PHIDIAS

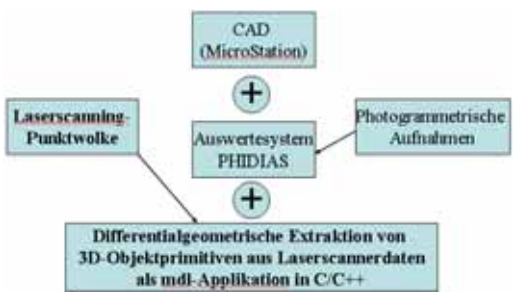


Abb. 4: Auswertesystem PHIDIAS

4 Methodik der Modellierung

Die reale Welt ist in Modelle zu überführen. Die Modelle basieren auf möglichst einfachen geometrischen Primitiven. Sichtbare Teile der Objekte sind die Oberflächen und die sie begrenzenden Kanten und Ecken. Ecken oder andere signifikante Objektpunkte lassen sich durch Einzelpunktmessverfahren aus den Daten extrahieren, zu Kanten bzw. Linien verbinden sowie zu Flächen zusammensetzen. Aus den Flächen können Körper gebildet werden.

Die weitaus größte Anzahl an Messwerten befindet sich auf den Flächen. Es ist deshalb sinnvoll, die Kanten und Ecken der Objekte als Schnitte der sie begrenzenden Flächen zu bilden. Die größtmögliche Information wird genutzt, wenn man möglichst alle auf den Flächen befindlichen Punkte in eine Ausgleichungsrechnung zu deren Parametrisierung einführt. Die zu einer Fläche gehörenden Laserpunkte sind zunächst zu aggregieren. Hierzu wurde ein automatisiertes Verfahren entwickelt, das auf einer topologischen und differentialgeometrischen Analyse der Laserpunkte basiert.

Die topologischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Laserpunkten lassen sich im Raum winkeloptimiert durch die räumliche Delaunay-Triangulation beschreiben. Entlang der Verbindungen der 3D-Delaunay-Trinagulation werden sequentiell die differentialgeometrischen Eigenschaften wie die Abstände benachbarter Punkte, die Abstände der Punkte zu lokalen Ebenen und die lokalen Krümmungseigenschaften untersucht. Die Krümmungs-

eigenschaften lassen sich für einfache geometrische Flächen wie Ebenen und Zylinder durch die beiden Hauptkrümmungen beschreiben. Sie sind für die Ebene beide gleich Null, für den Zylinder ist eine der beiden konstant gleich dem Reziprokwerte des Zylinderradius (Abb. 5). Im linken Bild zeigt sich die von Null verschiedene Hauptkrümmung des Zylinders mit der dunklen Einfärbung.

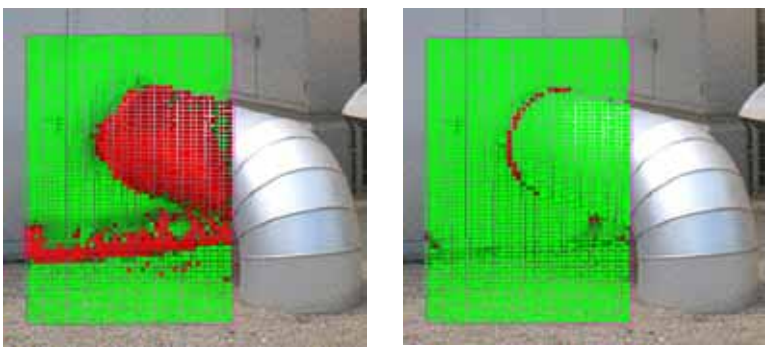


Abb. 5: Maximale (links) und minimale (rechts) Hauptkrümmungen an Ebenen und Zylindern (hell: kleine Beträge, dunkel: große Beträge)

Die aggregierten Punkte werden zur Parametrisierung einer Ausgleichung zugeführt. Ausreißer in den Punktdaten werden durch Ausreißertests eliminiert. Ergebnis sind ebene bzw. zylinderförmige Flächen (Abb. 6 und 7).

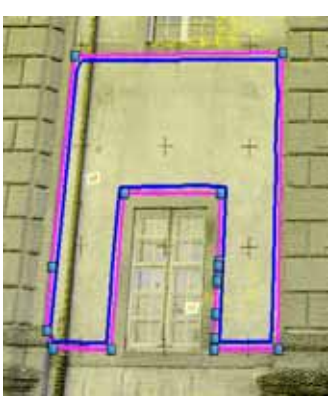


Abb. 6: Extrahierte ebene Flächen

Abb. 7: Extrahierte zylinderförmige Fläche

4.1 Einzelpunktmessung

Bei der Einzelpunktmessung wird aus der photogrammetrischen Aufnahme visuell ein Bildstrahl ausgewählt. Dieser wird mit einer Ebene, berechnet aus den Scannerpunkten einer räumlichen Umgebung um den Bildstrahl, geschnitten. Bild- und Scannerdaten wer-

den unter Nutzung ihrer Vorteile bezüglich höherer Auflösung des Bildes senkrecht zur Bildstrahlrichtung bzw. der hohen Entfernungsmessgenauigkeit der Scannermessung kombiniert genutzt. Das Verfahren bietet gute Ergebnisse insbesondere auf ebenen Flächen.

4.2 Lineare und punktuelle Elemente

Punktuelle und lineare Elemente wie Ecken, Kanten und Profile werden, um möglichst viele Messdaten zu nutzen, als Schnitte der angrenzenden Flächen bzw. als Schnitte der Objektoberflächen mit der festgelegten Profilebene bestimmt. Die genäherte Lage des Elements wird anhand des Bildes festgelegt. Auf dieser Grundlage wird der Suchraum für ebene und/oder Zylinderflächen definiert. Die Flächen werden auf der Grundlage der im Suchraum aggregierten Scannerpunkte per Ausgleichung parametrisiert und zu den gesuchten Elementen verschnitten. Beispiele für eine Kante und ein Profil zeigen Abbildung 8 und 9.

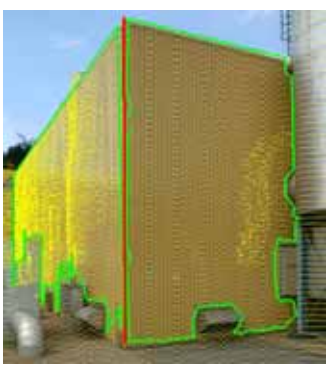


Abb. 8: Extraktion einer Kante

Abb. 9: Extraktion eines Profils

4.3 Lokale Koordinatensysteme

Lokale Koordinatensysteme werden für die Modellierung in CAD-Systemen benutzt. Sie definieren die aktuelle Zeichenebene oder die Achsen von aneinander gesetzten Einzelelementen wie z. B. Rohrsystemen. Grundlage solcher Koordinatensysteme sind einzelne ebene oder zylinderförmige Flächen der realen Objekte. Diese Flächen werden durch die darauf befindlichen Scannerpunkte repräsentiert. Die die Flächen repräsentierenden Scannerpunkte werden nach Festlegung eines die Fläche durchdringenden Bildstrahls anhand der photogrammetrischen Aufnahme aggregiert. Die Ebenenparameter für die xy-Ebene des lokalen Koordinatensystems bzw. die Zylinderparameter für die z-Achse werden durch Ausgleichung bestimmt (Abb. 10 bzw. 11). Die Ebenen des lokalen Koordinatensystems können für die photogrammetrische Einbildmessung benutzt werden, indem ausgewählte Bildstrahlen beispielsweise mit der xy-Ebene des lokalen Koordinatensystems verschnitten werden. Dies ist zum Beispiel für die Grundplatte in Abbildung 10 durchführbar.

Abb. 10: Lokales Koordinatensystem auf der Grundlage einer ebenen Fläche

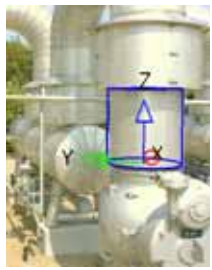


Abb. 11: Lokales Koordinatensystem auf der Grundlage einer Zylinderfläche

5 Anwendungsbeispiele

Die beschriebenen Funktionalitäten der kombinierten Verwendung von Bild und Scannerdaten bei der Modellierung wurden bei verschiedensten Projekten angewendet.

Der Eurogress Aachen wurde mit dem aus Laserscanner und Kamera kombinierten System vermessen. Die Modellierung erfolgte unter Nutzung der beschriebenen Funktionalitäten. Die Bilder wurden zu einem Rundum-Panoramabild zusammengesetzt (Abb. 12). Ergebnis war u. a. eine Ansichtszeichnung der Hallenwand (Abb. 13).

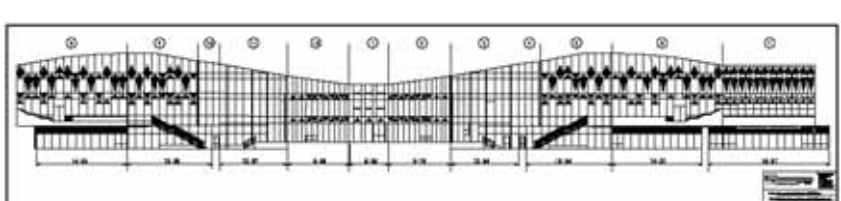


Abb. 12, 13: Eurogress Aachen, Panoramabild und Ansichtszeichnung

Im Bereich der Verkehrsbauwerke wurde die in Abbildung 14 und 15 dargestellte Brücke vermessen und modelliert.

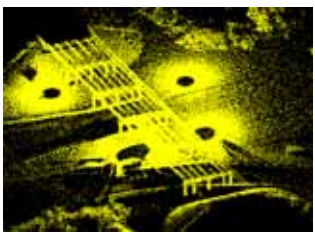
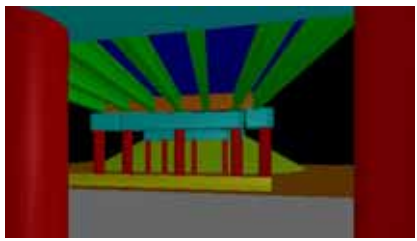



Abb. 14, 15: Brückenbauwerk, Punktwolke und Modell

Die Modelle können wie im Fall der Kirche St. Gereon in Köln-Merheim zur Simulation verwendet werden. Hier wurde geprüft, ob ein historisches Kreuz in den Altarraum der Kirche gehängt werden soll. Der Kircheninnenraum wurde vermessen und modelliert. Das Kreuz konnte im Modell im Beisein der Entscheidungsgremien so lange verschoben werden bis es den optimalen Platz erhielt (Abb. 16).

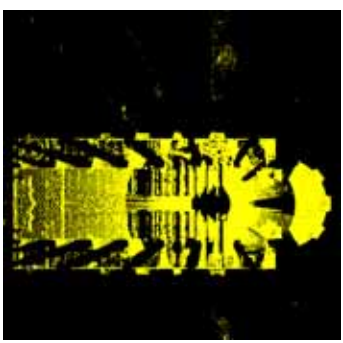


Abb. 16: St. Gereon Köln-Merheim: Punktwolke, Simulation in Bild und Modell

Weitere Anwendungsgebiete liegen in der Modellierung von Tatorten von Verbrechen und von Unfallorten zur Beweissicherung (Abb. 17).

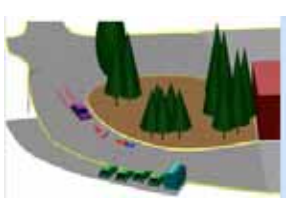


Abb. 17: Beweissicherung an Verbrechenstatorten bzw. bei Verkehrsunfällen

Für ein Großgerät im Tagebau Garzweiler im rheinischen Braunkohlerevier sollte für Umbaumaßnahmen die räumliche Lage einzelner Teile des Gerätes bestimmt werden. Das

Großgerät wurde hierzu vermessen, die benötigten Teile modelliert (Abb. 18). Weitere Teile können bei Bedarf aus den bereits vorhandenen Messdaten modelliert werden.

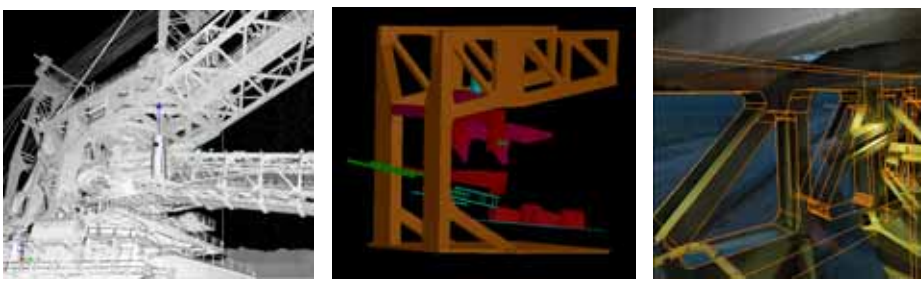


Abb. 18: Vermessung von Großgeräten: Punktwolke und Modell

6 Zusammenfassung

Die Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie liefert eine Datenbasis für die Modellierung der realen Welt, die die Nutzung der Vorteile beider Messverfahren ermöglicht. Mit PHIDIAS steht ein System zur Verfügung, das durch die superimpositive Darstellung den ständigen Wechsel zwischen den Auswertemethoden gewährleistet und zudem kombinierte Auswertemöglichkeiten eröffnet.

Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass die Palette der Anwendungsgebiete von der Vermessung historischer und moderner Bauwerke bis hin zu industriellen Anlagen und darüber hinaus reicht. Hierbei wurde in vielen Fällen die kombinierte Auswertung von Bild- und Scannerdaten genutzt. Die Kombination von photogrammetrischen und Laserscanning-Methoden in der Modellierung sollte z. B. durch automatisierte Nutzung der Farbinformation im Bild weiter ausgebaut werden.

Literatur

Becker, R. (2005): *Differentialgeometrische Extraktion von 3D-Objektprimitiven aus terrestrischen Laserscannerdaten*. Dissertation. In: Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 63

Becker, R. & W. Benning & C. Effkemann (2004): *3D-Monoplotting – Kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen*. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Bd. 129, Heft 5/2004. 347-355

Benning, W. & R. Schwermann (1997): *PHIDIAS-MS – Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsanwendungen.* In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 1/1997. 16-25

3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning

Thomas KERSTEN, Manuel BIEBERMANN und Michael SCHNEIDER

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt die exakte 3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch kombinierten Einsatz der digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm FinePix S2 Pro und des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100. Das Projekt wurde im Jahr 2005 am Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg in Absprache mit der Stadt Duderstadt durchgeführt. Das Duderstädter Westerturmensemble, bestehend aus Turm, Museum und umgebenden Gebäuden, wurde aus 58 digitalen Bildern und einer 3D-Punktwolke des Laserscanners mit einer Genauigkeit von 1–2 cm u. a. für Visualisierungen am Computer modelliert, die für die 500-Jahr-Feier des Westerturmes im Jahr 2006 präsentiert werden sollen. Die erforderlichen Arbeitsschritte von der Datenerfassung bis zur Visualisierung werden beschrieben und die erreichte Genauigkeit und der Arbeitsaufwand werden näher dargestellt.

1 Einleitung

Die Erstellung von Fassadenplänen und 3D-Gebäudemodellen erfolgt heute noch weitestgehend durch tachymetrische Aufnahmen oder durch digitale Architekturphotogrammetrie. Doch terrestrische Laserscanner stellen für Anwendungen in der Architektur und Denkmalpflege zunehmend eine echte alternative oder ergänzende Messmethode dar. Dafür stehen je nach Anforderung hinsichtlich Genauigkeit, Reichweite, Detailreichtum und Messgeschwindigkeit verschiedene Laserscanner als Kamera- oder Panorama-View-Scanner auf dem Markt zur Verfügung. Die Auswertung von tachymetrischen oder photogrammetrischen Daten zu 3D-Gebäudemodellen ist heute eine bewährte Methode. Die photogrammetrische Erfassung und 3D-Modellierung von historischen Gebäuden z. B. mit der Software PICTRAN wurde in einigen Publikationen der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (seit 1.01.2006 gehört das Department Geomatik zur neu gegründeten HafenCity Universität Hamburg) beschrieben: KERSTEN & ACEVEDO PARDO (2002), KERSTEN et al. (2003, 2004), KERSTEN (2005). Eine Software-Lösung für die kombinierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten mit dem Programm PHIDIAS der Firma PHOCAD, Aachen, wird in den folgenden Publikationen vorgestellt: SCHWERMANN & EFFKEMANN (2002), EFFKEMANN (2003), BENNING et al. (2004), BECKER & SCHWERMANN (2005).

In diesem Beitrag werden die Aufnahme des Westerturmensembles in Duderstadt durch digitale Architekturphotogrammetrie und durch terrestrisches 3D-Laserscanning sowie die kombinierte Auswertung dieser Daten mit PHIDIAS beschrieben. Die für die Auswertung und Modellierung notwendigen Arbeitschritte werden mit Angaben über die Genauigkeit aufgezeigt und die Ergebnisse des virtuellen Westerturms präsentiert.

2 Das Aufnahmeobjekt „Duderstädter Westerturmensemble“

Der Westerturm ist das Wahrzeichen der Stadt Duderstadt (Landkreis Göttingen) im südlichen Niedersachsen. Der Duderstädter Westerturm (ca. 35 × 8 × 52 m, s. Abb. 1) ist der letzte, vollständig erhaltene Turm der mittelalterlichen Stadtbefestigung, der bereits am 16. Oktober 1343 als Niedertor (valva inferior) erstmals urkundlich erwähnt wurde. Im Frühjahr 1424 wurden bei einem Großbrand der gesamte nördliche Stadtbereich und somit auch der Westerturm vernichtet. Wenige Wochen später wurde der Turm als Steinbau wieder errichtet, wobei erst 1505 die Dachkonstruktion vollendet wurde, welche durch ihre spätere und gleichmäßige Drehung den Turm zum Wahrzeichen der Stadt machte. Die Drehung erfolgte vermutlich wegen fehlender Versteifungen der Turmspitze. Durch den Bau der weit vor den Mauern liegenden Wallanlage und den damit neu entstandenen vier Walltoren verloren die vier inneren Stadttore ihre Bedeutung. Seit 1538 wurden dann auch Wohnräume im Turm vermietet. Im Jahre 1580 erbaute Valentin Seling ein Haus direkt am Westerturm, welches nach Um- und Neubauten zum späteren Bachmann´schen Haus wurde. Am 28.08.1989 erwarb die Stadt Duderstadt das Gebäude mit dem Gedanken, den Westerturm der Allgemeinheit zugänglich zu machen. Überraschend wurde bei den anschließend durchgeführten bautechnischen Untersuchungen festgestellt, dass sich im Gebäude das einzige in ursprünglicher Höhe erhaltene Stück der Stadtmauer befindet.

Im Jahre 1999 wurden bei der Erstellung eines Nutzungskonzepts gravierende Schäden an der Holzkonstruktion des Daches aufgedeckt, welche zu einer grundlegenden Sanierung des Turmes im Jahre 2002 führten. Im Zuge dieser Sanierung wurde auch die Stadtmauer im alten Bachmann´schen Haus freigelegt und die Struktur der alten Hausfassade durch eine Glaskonstruktion ersetzt. Das so restaurierte Ensemble wurde am 12.08.2004 feierlich eingeweiht und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Abb. 1: Duderstädter Westerturmensemble (Mitte), Front- (links), Hinteransicht (rechts)

3 Die Aufnahmesysteme

Die Aufnahme des Duderstädter Westerturmensembles erfolgte mit der handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm FinePix S2 Pro und dem terrestrischen Laserscanning-System Mensi GS100. Die wesentlichen technischen Daten der digitalen Kamera sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Technische Daten der Kamera Fujifilm FinePix S2 Pro

Kamera	Digitale Spiegelreflexkamera
CCD	23,3 mm × 15,6 mm Super-CCD
Pixel	6 (phys.), 12,1 Mio. (interpol.) Pixel
Bilddateigröße	Maximal 4256 × 2848 Pixel
Dateiformat	TIFF-RGB (ca. max. 35 MB/Bild)
Speichermedium	Microdrive 1GB (max. 28 Bilder)
Objektiv	Nikon-F-Bajonett/Nikkor 28 mm
Aufnahme	ca. 1,5 Bilder/Sek., max. 5 Bilder
Empfindlichkeit	ISO 100, 160, 200, 400, 800, 1600
Schnittstellen	USB, Video Out
Gewicht	ca. 820g (ohne Batterien/Objektiv)

Das Trimble 3D-Laserscanning-System GS100 wird von Mensi S.A. in Frankreich hergestellt und besteht aus Messinstrument mit Zubehör und entsprechender Erfassungs- und Auswertesoftware. Die Streckenmessung erfolgt nach dem Impulslaufzeitverfahren mit einem grünen Laser mit 532 nm Wellenlänge. Die Genauigkeit der Einzelstrecke beträgt 6 mm. Die optimale Messentfernung des GS100 wird mit 2–100 m angegeben. Durch die bestmögliche Winkelauflösung von 0,0018° lässt sich in 100 m Entfernung eine Gitterweite von 3 × 3 mm realisieren. Der Panorama-View-Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann bis zu 5000 Punkte in der Sekunde messen, wobei ein Laserpunkt in 50 m Entfernung 3 mm groß abgebildet wird. Weitere technische Angaben und Abbildungen vom System sind in HÖNNIGER & KERSTEN (2005) aufgeführt. Die vollständigen technischen Daten sind unter MENSI (2004) zu finden.

4 Photogrammetrische Objektaufnahme und Laserscanning

Die Objektaufnahme erfolgte im Februar 2005 an insgesamt drei Tagen in folgenden Arbeitsschritten: Passpunktsignalisierung für das Laserscanning und für die photogrammetrische Aufnahme, geodätische 3D-Netzmessung und Passpunktbestimmung mit den Tachymetern Leica TCRP 1201 und Leica TCA 1105+, photogrammetrische Aufnahme und Laserscanning. Aufgrund der Höhe des Westerturmes wurde eine fahrbare Drehleiter mit einer maximalen Arbeitshöhe von 28 m (Abb. 2) für die Passpunktsignalisierung und für zusätzliche Aufnahmen mit der Kamera eingesetzt. Als photogrammetrische Passpunkte dienten 49 Signale, die am Objekt verteilt angebracht wurden. Zur Verknüpfung und Georeferenzierung der Laserscanning-Punktwolken wurden neun grüne Mensi-Targets und jeweils sechs Kugeln an der Turmwand und auf den Tachymeterstandpunkten verwendet. Das 3D-Netz bestand wegen der Gebäudeanordnung und der Einbindung des Innenbereiches des

Turmes und Museums aus vier Teilnetzen mit insgesamt zwölf Standpunkten, von denen die Passpunkte für Photogrammetrie und Laserscanning gemessen wurden. In einer Ausgleichung mit der Software PANDA (GeoTec, Laatzen) wurden die Netz- und Passpunkte mit einer Standardabweichung von besser als 1,5 mm bestimmt. Der Außen- und Innenbereich des Westerturmensembles wurde mit insgesamt 137 Bildern (5 GB Bilddaten) aufgenommen, davon wurden für die spätere dreidimensionale Auswertung und Kamerakalibrierung lediglich 58 Bilder verwendet.

Mit dem Laserscanner GS100 wurde das Objekt von zehn Scannerstandpunkten in einer Rasterweite von 93 mm auf 10 m gescannt. Objektdetails wie Fenster oder Turmfigur wurden mit einer höheren Auflösung von 5 mm auf 10 m gescannt. Die Steuerung des Scanners erfolgte mit der Software PointScape, wobei die Selektion der Scanbereiche durch das Video-Framing erfolgte. Die jeweils sichtbaren Targets und Kugeln (angebracht an Turmwand und auf Tachymeterstandpunkten) wurden für die spätere Verknüpfung und Georeferenzierung der Scans separat von jedem Standpunkt gescannt und durch die Software als Passpunkte erkannt. Beim Scannen der Turmspitze stellte sich heraus, dass das schwarze Schieferdach das grüne Laserlicht kaum reflektierte, sodass dieser Gebäudeteil später allein durch die Photogrammetrie rekonstruiert werden musste.

Abb. 2: Drehleitereinsatz für Passpunktsignalisierung (links) und photogrammetrische Aufnahme (Mitte), Laserscannerstandpunkt (rechts)

5 Datenauswertung

5.1 Registrierung und Geo-Referenzierung der Punktwolken (Scans)

Für eine manuelle Registrierung und Geo-Referenzierung der Scans kam die Software RealWorks Survey 4.2 der Firma Mensi zum Einsatz. Jede Scannerstation wurde über drei bis sieben Targets und Kugeln mit den anderen verknüpft, wobei die Genauigkeit für die Registrierung der Punktwolken zwischen 3,8 mm (Minimum) und 8,6 mm (Maximalwert) lag. Die Geo-Referenzierung der gesamten Punktwolke erfolgte über 23 Passpunkte (6 Kugeln auf Netzpunkte, 9 Targets und 8 Kugeln an der Turmwand, s. Abb. 3 Mitte) mit einem RMS von 8,8 mm an den Passpunkten, was für die Objektrekonstruktion bei weitem ausreichte.

Anschließend wurde die gesamte Punktwolke (Abb. 3 links) noch bereinigt, in dem überflüssige Punkte, die nicht zu dem Objekt gehörten, gelöscht wurden. Für die Objektrekonstruktion wurde die Punktwolke zunächst segmentiert und der Turm als interessierender Bereich für die weitere Auswertung ausgeschnitten. Danach wurden die einzelnen Wände des Turmes und zusätzlich die vier Ecken des Turmes segmentiert. Beim Zuschnitt der Punktwolke, der auch beim Anbau und der Turmspitze durchgeführt worden ist, wurde immer darauf geachtet, dass mit jeder Punktwolke nur eine Wand dargestellt wird. Somit entstanden aus einer gesamten Punktwolke 15 verschiedene kleinere Punktwolken, die anschließend jeweils separat als ASCII-File exportiert wurden, um in PHIDIAS verarbeitet werden zu können.

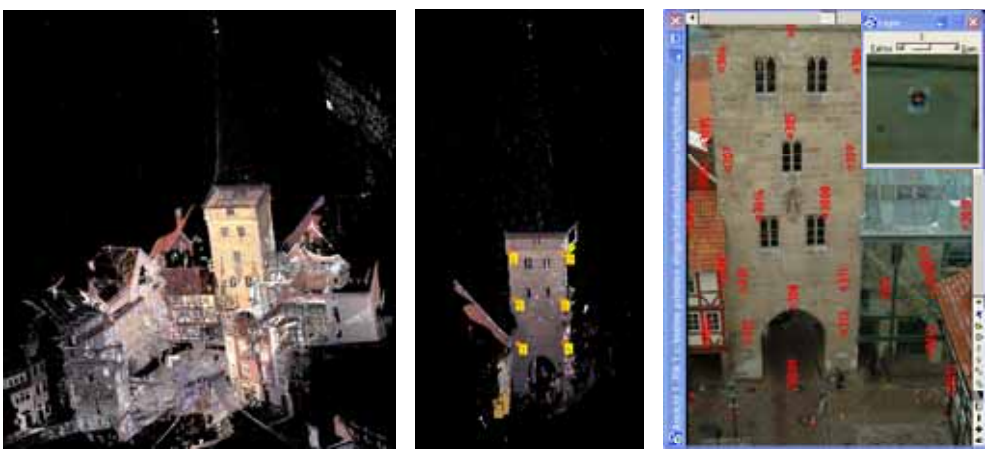


Abb. 3: Gesamte registrierte Punktwolke (links) und Ausschnitt mit Passpunkten zur Geo-Referenzierung (Mitte); Bild mit Bildpunktmessungen (rechts)

5.2 Bildorientierung und Kamerakalibrierung

Vor der eigentlichen 3D-Auswertung wurden 58 ausgewählte, digitale Bilder in einem Bildverband durch Bildpunktmessungen mit dem Programm PHIDIAS der Firma PHOCAD, Aachen, verknüpft und orientiert. Abbildung 3 rechts zeigt exemplarisch in einer rotierten Darstellung gemessene Bildpunkte und die Messung eines Passpunktes. Insgesamt wurden im Durchschnitt 12 Bildpunkte pro Bild und jeder Objektpunkt in sechs Bildern gemessen, wodurch eine gute Verknüpfung des Bildverbandes und eine zuverlässige Punktbestimmung gewährleistet waren. Die Bildorientierungen wurden simultan mit der Kamerakalibrierung in einer anwendergesteuerten Bündelblockausgleichung bestimmt. Die Steuerung durch den Anwender erfolgte hauptsächlich wegen der komplexen Aufnahmekonfiguration der Innen- und Außenaufnahmen, die keinen automatischen Auswerteprozess zuließ. Durch die Kalibrierung der Kamera wurden u. a. systematische Fehler durch die hohe Objektivverzeichnung in der weiteren Auswertung kompensiert. Alle Bildpunkte konnten mit einer Bildmessgenauigkeit von $s_x = 4{,}8$ µm und $s_y = 4{,}9$ µm gemessen werden, was einer Genauigkeit von besser als einem Pixel entspricht. Die Standardabweichungen für die Objektpunktkoordinaten lagen bei 2 mm für signalisierte Punkte und besser als 1 cm für natürliche Punkte. Diese Ergebnisse bestätigen das hohe Genauigkeitspotenzial der

digitalen SLR-Kameras für Anwendungen in der Architekturphotogrammetrie, das auch in anderen Projekten erreicht wurde (KERSTEN & ACEVEDO PARDO 2002, KERSTEN et al. 2003, 2004, KERSTEN 2005).

5.3 Objektrekonstruktion durch kombinierte Auswertung

Die Objektrekonstruktion wurde mit dem photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS, das als eine Anwendung auf das CAD-System MicroStation aufgesetzt ist, durchgeführt. Durch die Kombination dieser Programme können die ermittelten Daten aus PHIDIAS direkt in MicroStation angezeigt und weiter bearbeitet werden. Zur photogrammetrischen Auswertung stehen acht Ansichtsfenster zur Verfügung, wobei hier aber maximal drei Bilder geladen wurden und dabei nur ein Bild zum Zeichnen im Vollbildmodus dargestellt wurde. Für eine präzise Punktmessung kann eine skalierbare Lupe geöffnet und der so ausgewählte Bereich vergrößert dargestellt werden. Die im ASCII-Format eingelesenen Punktwolken werden in ein internes Binärformat umgewandelt, um jedes weitere Einlesen dieser Daten zu beschleunigen und die Dateigröße zu verkleinern.

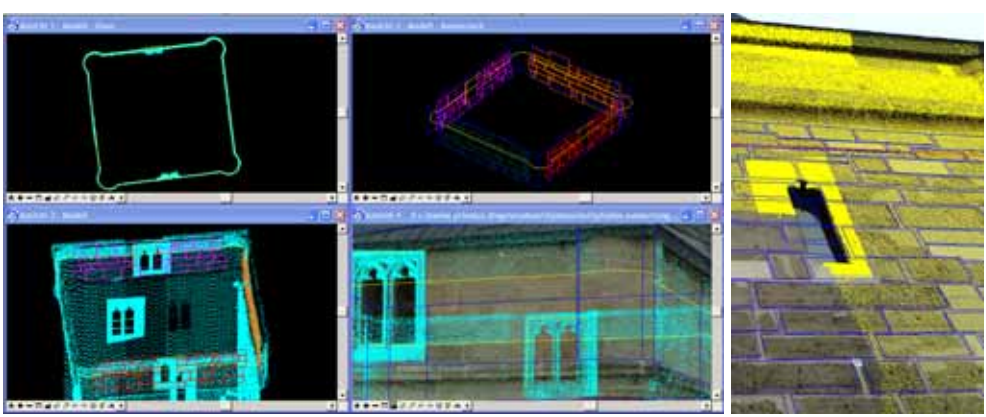


Abb. 4: Darstellung der Punktwolke in Kombination mit Bilddaten (links), Monoplotting der Steine im Bild und in der Punktwolke (rechts)

Das Monoplotting in PHIDIAS wird durch die Kombination von Bild- und Laserscanningdaten möglich. Dazu werden die Punktwolke und das dazugehörige Bild gleichzeitig am Bildschirm dargestellt (s. Abb. 4 rechts). In einem ersten Schritt wird die Zeichnungsebene festgelegt, wobei darauf zu achten ist, dass die Koordinatenachsen rechtwinklig auf der Gebäudeseite liegen, um eine spätere Einzelsteinauswertung zu vereinfachen. Die nötige Tiefeninformation wird nach Ebenenfestlegung aus der Punktwolke erhalten. Für die Einzelsteinauswertung wird die Punktwolke dann „ausgeblendet“. Das Zeichnen der Einzelsteine erfolgte für die volumenhafte 3D-Auswertung als „geschlossene Polygone“. Die Einzelsteine wurden bis über die eigentlichen Kanten des Gebäudes sowie über die Fenster und Durchfahrten gezeichnet, um nach der Auswertung aller Gebäudeseiten die exakten Ecken und Kanten im CAD-Programm durch Schnitt zu bestimmen. Sämtliche Einzelsteine wurden anschließend auf die eigentliche Wandstärke, die durch Handaufmaß mit einer Stärke von bis zu 1,55 m ermittelt wurde, in einen 3D-Volumenkörper extrudiert.

Ein weiterer Schritt stellte die Konstruktion der abgerundeten Elemente im oberen Bereich des Turmes dar. Hierfür wurden alle vorbereiteten Punktwolken geladen und in einer Draufsicht angezeigt (s. Abb. 4), sodass daraus eine Polylinie gezeichnet werden konnte, die zur weiteren Verarbeitung in AutoCAD übertragen wurde. Die Turmspitze wurde wegen der schlechten Laserreflexion am schwarzen Schiefer aus photogrammetrischen Messungen (Vorwärtsschnitt in mindestens drei Bildern) konstruiert. Wegen der schlecht zu identifizierenden Punkte am Schieferdach der Turmspitze konnten diese Objektpunktkoordinaten nur mit einer Standardabweichung von besser als 3 cm bestimmt werden. Das Ergebnis der Turmspitzenrekonstruktion ist in der Abbildung 5 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Rekonstruktion des Westerturmensembles ist in BIEBERMANN & SCHNEIDER (2005) zusammengefasst.

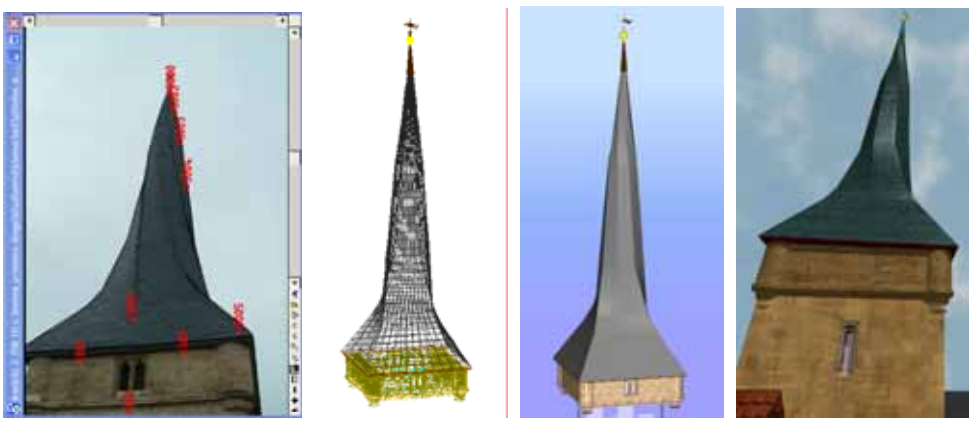


Abb. 5: Rekonstruktion der Turmspitze aus photogrammetrischen Bildpunktmessungen (links); Darstellung als Drahtmodell (2.v.l.), als schattiertes Modell in AutoCAD und als gerendertes Modell in Highlight Pro (rechts)

5.4 Visualisierung

Für die Visualisierung des Westerturms wurde die umgebende Topographie (Straßen, Wege, Pflasterübergänge, Schilder, Laternen, Abfalleimer und Wasserlauf) und die angrenzenden Gebäude (generalisiert) durch eine tachymetrische Aufnahme mit dem Leica TCRP 1105+ aufgenommen. Die Bearbeitung dieser Daten erfolgte mit der Software Geo7. Ergänzt wurden diese Aufnahmen durch ein detailliertes Handaufmaß von einigen Objekten wie Laternen und Schildern.

Die Visualisierung des Westerturmensembles erfolgte mit verschiedenen Programmen: AutoCAD, AECViz von TORNADO Technologies Inc., Kanada, 3D Studio VIZ und Highlight Pro. In AutoCAD wurde das 3D-Volumenmodell mit entsprechenden Texturen für die jeweiligen Objektteile gerendert, um so eine Qualitätskontrolle der modellierten Daten zu erhalten und um daraus perspektivische Ansichten im BMP-Format zu erstellen (Abb. 6 oben). Eine interaktive Animation wurde mit AECViz erstellt, in dem das gesamte DWG-File (132 MB) in ein 5 MB großes ausführbares Programm (EXE-File) umgewandelt wurde, das der Betrachter interaktiv aus allen Perspektiven anschauen und auch begehen kann (Abb. 6 rechts oben). In Highlight Pro wurde eine Videosequenz mit einer Länge von

2:41 min in einer Auflösung von 640 × 480 Pixel als kodiertes MPEG-File (57 MB) erstellt (s. Abb. 6 unten), während mit 3D Studio ein virtueller Rundgang durch und im Turm als Film (3:31 min, AVI, 727 MB) erstellt wurde. Alle Visualisierungsdaten stehen dem Interessierten in Zukunft an einem Computer-Terminal in der Turmbäckerei zur Verfügung.

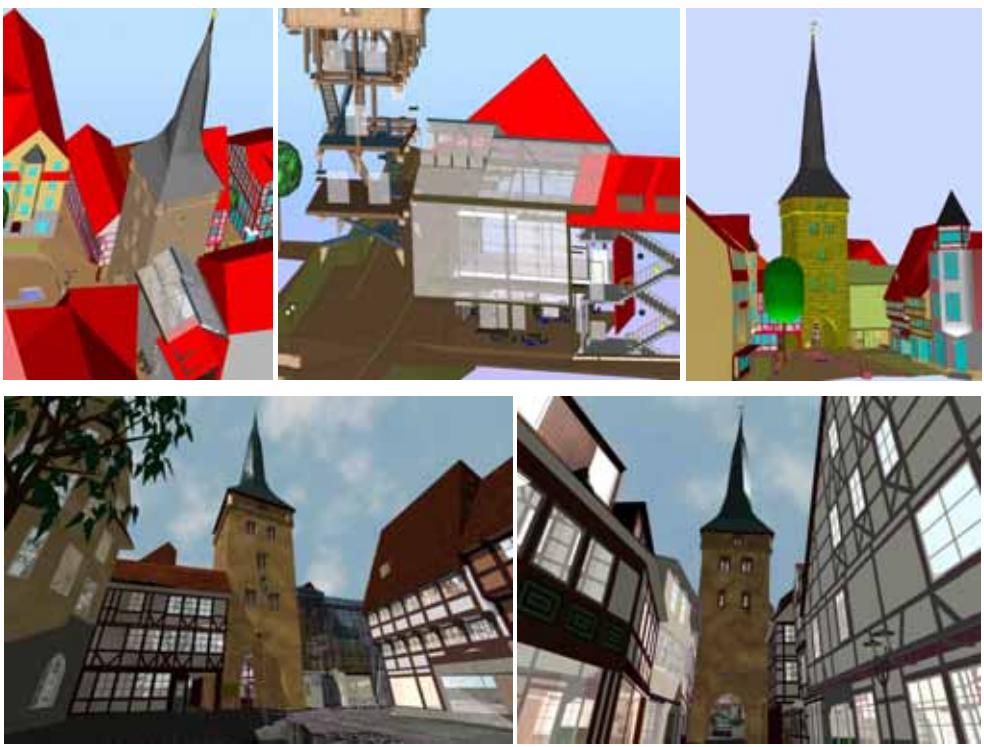


Abb. 6: Visualisierungen des Westerturms mit AutoCAD (oben links und oben Mitte), mit AECViz (oben rechts) und mit Highlight Pro (unten)

6 Zeit- und Kostenmanagement

Alle Bearbeitungen mit PHIDIAS konnten mit einem Standard-Notebook mit 512 MB RAM, einem 1,5 GHz Intel Centrino Prozessor und einer nVIDIA Geoforce Graphic-Card mit 64 MB durchgeführt werden. Der Arbeitsaufwand für die gesamte Projektbearbeitung betrug 623 Arbeitsstunden, die je nach Tätigkeit mit entsprechenden aktuellen Stundenansätzen für Messgehilfe, Techniker und Ingenieur verrechnet wurden. Rechnet man zu diesen Kosten die Instrumentenkosten und Spesen sowie einen Projektgewinn von 10 % und die 16%ige Mehrwertsteuer hinzu, so ergeben sich theoretische Gesamtkosten von knapp 35.000 Euro für das Projekt, die allerdings nicht marktgerecht erscheinen. In Abbildung 7 ist der prozentuale Arbeitsaufwand der einzelnen Arbeitsschritte dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass 52 % der gesamten Arbeitszeit mit CAD-Bearbeitung und Visualisierung aufgewendet wurden. In der Zeit für Visualisierung sind nur die Arbeiten mit AutoCAD und AECViz enthalten, da die Videosequenzen später erstellt wurden. Optimierungspoten-

zial für solch ein Projekt liegt bei der Objektaufnahme in der Anzahl der verwendeten Passpunkte, in der geodätischen Passpunktbestimmung, in der Reduktion des Laserscanningaufwands auf wichtige Objektteile, bei der CAD-Bearbeitung durch zunehmende Erfahrung und durch Weglassen von Details.

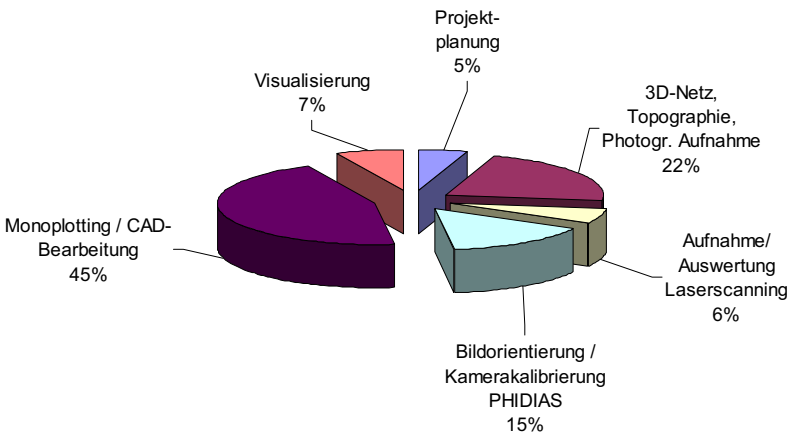


Abb. 7: Prozentualer Arbeitsaufwand im Projekt Duderstädter Westerturmensemble

7 Fazit und Ausblick

Das Duderstädter Westerturmensemble wurde in einer kombinierten Auswertung von digitalen Bilddaten einer Spiegelreflexkamera und 3D-Punktwolken eines terrestrischen Laserscanners für eine detaillierte Visualisierung von Innen und Außen erfolgreich als virtuelles 3D-Volumenmodell rekonstruiert. Die eingesetzten Technologien (Instrumente und Software) ermöglichten eine detaillierte und exakte Rekonstruktion des Objektes mit einer Genauigkeit von 1–2 cm. Die kombinierte Auswertung mit PHIDIAS auf einem Standard-Notebook mit Doppelbildschirm erwies sich als sehr effizient, da eine direkte CAD-Anbindung für die weitere Modellierung vorhanden war. Im Zeitalter der digitalen Photogrammetrie ist es aber unverständlich, dass in PHIDIAS immer noch eine innere Orientierung „gemessen“ werden muss, wenn die Pixel- und die Chip-Größe der Kamera bekannt sind.

Das Laserscanning bereitete beim schwarzen Schieferdach der Turmspitze Probleme, da von dort kaum reflektierte Laserimpulse zurückkamen, sodass für diesen Bereich eine reine photogrammetrische Auswertung erfolgen musste, der wegen des Aufnahmeabstandes leicht ungenau modelliert wurde. Für Anwendungen in der Architektur (z. B. Bauwerkserfassung) lohnt es sich, den Laserscanner bei einer steingerechten Auswertung oder bei der Erfassung von Objektdetails wie Skulpturen und Ornamente in Kombination mit der Photogrammetrie einzusetzen, wenn man die Objekte mit einer sehr hohen Punktdichte erfassen kann. Diese Objektdetails kann man dann über einfache Schnitte im CAD modellieren.

Das steingerecht ausgewertete und konstruierte 3D-Volumenmodell des Westerturmensemble und die daraus generierten Visualisierungen stehen dem interessierten Besucher in einem Infoterminal am Westerturm rechtzeitig zur 500-Jahr-Feier im Jahr 2006 zur Verfügung.

Literatur

Becker, R. & R. Schwermann (2005): *Bestandserfassung durch kombinierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 134-141

Benning, W., Becker, R. & C. Effkemann (2004): *Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen aus Laserscannerdaten, gestützt durch photogrammetrische Aufnahmen*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 213-220

Biebermann, M. & M. Schneider (2005): *3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning.* Unveröffentlichte Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, Juni

Effkemann, C. (2003): *Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen aus Laserscannerdaten, gestützt durch photogrammetrische Aufnahmen*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 203-208

Hönniger, C. & T. Kersten (2005) *Topographische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 224-231

Kersten, T. (2005): *Digitale Architekturphotogrammetrie als ein Beispiel für die praxisorientierte Ausbildung an der HAW Hamburg.* HAW Hamburg, Fachbereich Geomatik, Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr. h.c. Jürgen Zastrau, 8. Juli 2005

Kersten, T. & C. Acevedo Pardo (2002): *3-D Objektaufnahme von historischen Gebäuden durch digitale Architekturphotogrammetrie für Visualisierungsaufgaben und für Facility Management.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 42-56

Kersten, T., Eilmus, B., Lindstaedt, M. & C. Acevedo Pardo (2003): *3D-Erfassung und Visualisierung des Celler Schlosses durch digitale Architekturphotogrammetrie.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 213-222

Kersten, T., Acevedo Pardo, C. & M. Lindstaedt (2004): *3D Acquisition, Modelling and Visualization of north German Castles by Digital Architectural Photogrammetry*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Commission V, Part B2. 126-132

Mensi (2004): *GS 100 3D laser scanner*. www.mensi.com/website2002/gs100.asp

Schwermann, R. & C. Effkemann (2002): *Kombiniertes Monoplotting in Laserscanner- und Bildddaten mit PHIDIAS.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning: Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 57-70

Orthoprojektionen und Abwicklungen höherer Komplexität – Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis

Olaf PRÜMM, Michael POSPIŠ und Mustapha DOGHAILI

Zusammenfassung

Es werden Möglichkeiten zur Erstellung von Bildplänen aus den Farb- oder Intensitätswerten von Laserscans beschrieben. Neben der Orthogonalprojektion auf eine ebene Fläche wird anhand von Beispielen gezeigt, wie Gebäudeteile oder Tunnel über eine Orthogonalprojektion auf einen Zylinder oder wahlweise elliptischen Zylinder in die Planebene abgewickelt werden können. Außerdem wird aufgezeigt, wie die Laserscans bearbeitet werden müssen, bevor sie zur Planerstellung verwendet werden können. Alle Anwendungsbeispiele wurden mit der Software LupoScan von Lupos3D erstellt.

1 Einleitung

Die Vorteile der Bestandsaufnahme mit dem 3D-Laserscanner liegen in der hohen Punktdichte am aufzunehmenden Objekt und der damit einhergehenden Vollständigkeit. Die einmal erfassten Daten bilden die Grundlage für eine Vielzahl von Auswertungsmöglichkeiten.

Das Ziel aller Weiterverarbeitungsschritte liegt in der Reduzierung der zum Teil mehrere Gigabyte großen Datenmenge auf sinnvolle Weise. Ein Verfahren ist die 3D-Modellierung mithilfe von geometrischen Primitiven oder die Flächenrückführung. Hierbei liegt die Priorität im Erhalt der Dreidimensionalität der Daten. Die Modellierungen können aber – einmal abgesehen von einfach aufgebauten Industrieanlagen – sehr zeitaufwändig sein. Dazu kommt, dass viele Kunden aus den Bereichen Architektur und Tunnelbau „nur“ verzerrungsfreie, maßgerechte Pläne benötigen.

Das Programm LupoScan bietet daher neben den Möglichkeiten zur Modellierung einfacher Regelkörper und der Berechnung von Schnitten und Orthophotos die Berechnung von Zylindrischen und Elliptisch-Zylindrischen Orthoprojektionen mit anschließender Abwicklung in die Ebene. Die einzelnen Arbeitsschritte und Ergebnisse dieses Verfahrens werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

2 Datenbasis

Zur Erstellung eines Orthophotos werden radiometrische und geometrische Informationen des darzustellenden Objektes benötigt. Diese Informationen liefern 3D-Laserscanner, die mit dem Phasenvergleichsverfahren oder einer integrierten bzw. dem System aufgesetzten Kamera arbeiten. Ferner können Aufnahmen, die mit Messkameras von externen Standpunkten aus gemacht wurden, über das Oberflächenmodell in die Projektionsfläche gerechnet werden.

Abb. 1: Aufnahme der Daten mit dem Z+F Imager 5003/Leica HDS 4500

Für die folgenden Beispiele bilden Laserscans des Z+F Imager 5003/Leica HDS 4500 die Grundlage.

3 Datenaufbereitung

Bevor die Daten des Laserscans auf die jeweiligen Oberflächen projiziert werden können, sind einige Schritte der Datenaufbereitung notwendig. So müssen Kalibrierwerte angebracht und Fehlmessungen durch geeignete Filter beseitigt werden.

3.1 Kalibrierung

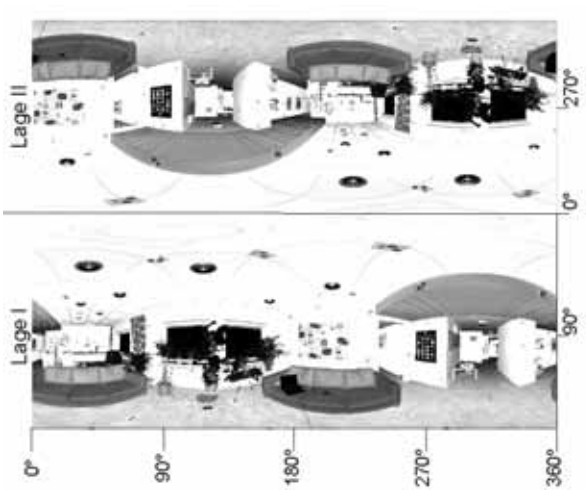


Abb. 2: 360°-Scan

Der Laserstrahl des Z+F Imager 5003/Leica HDS 4500 wird über einen Spiegel, der um eine vertikale und horizontale Achse rotiert, in alle Raumrichtungen abgelenkt. Aufgrund dieses Instrumentenaufbaus lassen sich die Instrumentenfehler analog der Fehler eines Theodoliten beschreiben (NEITZEL 2006). Zur Bestimmung des Ziel- und Kippachsenfehlers sowie einer möglichen Exzentrizität werden Zielmarken in einem 360°-Scan in beiden Lagen gemessen. Anschließend werden die Daten um die ermittelten Werte korrigiert.

3.2 Filterung

Die Laserscans enthalten zum Teil fehlerhafte Messwerte. Sie resultieren aus Messungen, die wegen des Durchmessers des Laserstrahls an Kanten sowohl ein vorderes als auch ein hinteres Objekt treffen. Wegen der so verfälschten Streckenmessungen liegen solche Punkte als Fehlmessung im Raum. Hinzu kommen fehlerhafte Messungen aufgrund von Reflexionen an Spiegeln, Lacken oder Glas. Weitere Fehlmessungen entstehen, wenn der Laserstrahl von keinem Objekt reflektiert wird (Messungen in den Himmel). Der Scanner verarbeitet in diesem Fall zufälliges atmosphärisches Rauschen zu einem Messwert. Wie von PRZYBILLA (2005) bereits gezeigt wurde, lassen sich Fehlmessungen durch geeignete Filterung weitestgehend beseitigen. In der Software LupoScan können isolierte Messwerte mithilfe von Abstandsuntersuchungen benachbarter Messpunkte beseitigt werden. Des Weiteren können Messungen aufgrund zu schwacher oder zu starker Intensitäten gefiltert werden.

3.3 Orientierung

In der Regel fließen mehrere Aufnahmen in einen Bildplan ein. Laserscans verschiedener Standpunkte können daher mithilfe der räumlichen Ähnlichkeitstransformation zueinander oder in ein übergeordnetes Referenzsystem orientiert werden.

4 Orthophotos und Abwicklungen

Orthophotos entstehen durch die senkrechte Projektion eines im Raum bestimmten Intensitäts- oder Farbwerts auf eine ebene gerasterte Oberfläche. Neben dem Intensitätswert kann der Abstand des Punktes zur Projektionsfläche als Grauwert oder in Form einer Farbkodierung in das Rasterbild geschrieben werden. Diese Tiefenbilder bieten eine schnelle Möglichkeit Verformungen am Objekt zu erkennen. Als digitales Oberflächenmodell (DOM) werden die Tiefenbilder weiterhin analog der differentiellen Entzerrung (LUHMANN 2000) zur Berechnung von farbigen Orthophotos mit Aufnahmen von externen Messkameras verwendet. Neben der senkrechten Projektion auf ebene Flächen ist es möglich, die Messungen zunächst auf einfach gekrümmte Flächen, wie beispielsweise Zylinder, zu projizieren und anschließend in einen Bildplan abzuwickeln. Die Vorteile aller so entstandenen Bildpläne liegen in der hohen Genauigkeit und dem hohen Informationsgehalt.

Abb. 3: Orthophoto aus Intensitätswerten (links), Tiefenbild eines Gewölbes (rechts)

Folgende Parameter werden zur Bildplanerstellung benötigt:

- Parameter zu Beschreibung der Projektionsoberfläche
- Definition des Raumes, aus dem Punkte projiziert werden sollen, in Form von Vor- und Hinterraum
- Rasterauflösung des Zielbildes
- Z-Buffer mit Toleranzschranke zur Regelung von Oversamplings
- Radiometrische Parameter zur Beschreibung des Laserlichts

4.1 Projektionsfläche

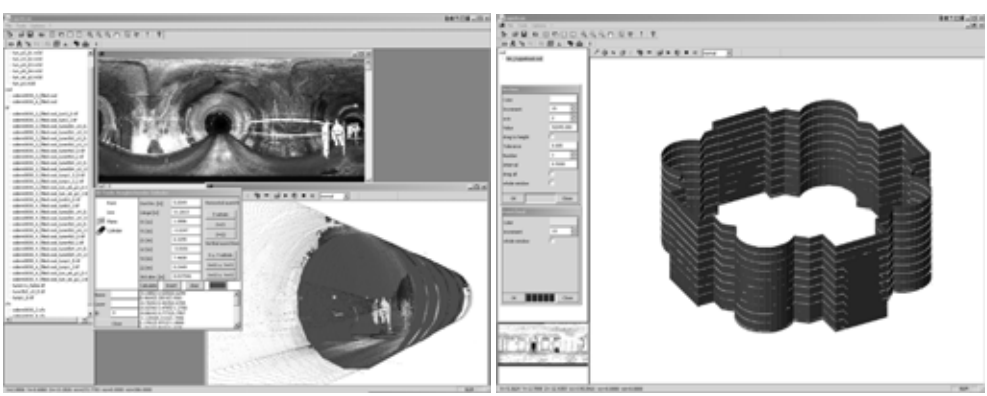


Abb. 4: Projektionsfläche als Ausgleichskörper (links), konstruktive Bestimmung der Projektionsflächen (rechts)

Sollte die Projektionsfläche nicht in Form einer Sollfläche gegeben sein, so gibt es zwei Möglichkeiten, diese Fläche festzulegen. Zum einen ist es mit LupoScan möglich, Ausgleichsebenen oder ausgeglichene Regelkörper zu berechnen, die direkt als Projektionsfläche verwendet werden können. Zum andern können die benötigten Oberflächen konstruktiv auf Grundlage von Schnitten aus der Punktewolke erstellt werden.

4.2 Korrektur der Intensitäten

Die Intensität des ausgesendeten Laserlichtes nimmt in Abhängigkeit zur zurückgelegten Strecke ab. Des Weiteren ist sie abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und des Auftreffwinkels auf das Objekt. Einige dieser Eigenschaften sind durchaus erwünscht. Da sie dem späteren Betrachter die Möglichkeit geben, die resultierenden Bilder zu interpretieren, müssen andere Effekte korrigiert werden, um ein homogenes Orthophoto zu bekommen. In LupoScan wird an der Intensität eine streckenabhängige Korrektur angebracht. Diese Korrektur ist nicht linear von der Entfernung abhängig und muss den spezifischen Eigenschaften verschiedener Laserscanner angepasst werden. Ferner kann eine Korrektur aufgrund des Auftreffwinkels des Laserlichts auf die Projektionsfläche angebracht werden. Natürlich ist es aufgrund der Informationsdichte durchaus möglich, die Intensität hinsichtlich des Auftreffwinkels am Objekt zu korrigieren. Dies hätte aber den unerwünschten Nebeneffekt, dass das abgebildete Objekt nicht mehr räumlich wirkt. Einfarbiger Stuck würde so im Bildplan nicht mehr sichtbar sein. In LupoScan besteht daher die Möglichkeit, eine Korrektur in Abhängigkeit des Auftreffwinkels auf die Projektionsfläche anzubringen. Damit wird eine „globale“ Homogenität der Bilder erreicht, ohne visuelle Informationen über das Objekt zu verlieren.

4.3 Z-Buffer

Sobald mehrere Messwerte in ein Bildraster fallen, muss unterschieden werden, ob die Werte innerhalb des Messrauschens liegen und zur Qualitätssteigerung gemittelt werden sollen, oder ob es sich um eine tatsächliche Mehrdeutigkeit bezüglich des Bildrasters handelt. Zur korrekten Behandlung des letzten Falles kann der Bearbeiter eingeben, welcher Messwert im Bildplan erscheinen soll – entweder der dem Betrachter am nächsten liegende oder der entfernteste. Der Z-Buffer sortiert die eingehenden Messwerte eines Rasters und mittelt nur Werte innerhalb einer gewissen Toleranz.

4.4 Zylindrische Abwicklungen

Für die meisten Anwendungen ist eine Orthogonalprojektion auf eine ebene Fläche ausreichend. Bei der Bestandsaufnahme für die Bereiche Tunnelbau, Architektur, Denkmalpflege und Archäologie gibt es jedoch eine Anzahl von Beispielen, wo es zur Wahrung einer möglichst hohen Maßstäblichkeit in den Zielplänen sinnvoll ist, Objekte auf einen Zylinder zu projizieren und dann in die Ebene abzuwickeln. Bei der Zylinderabwicklung ist zu berücksichtigen, dass der Maßstab in Richtung der Abwicklung abhängig ist von der Entfernung eines Objektes zum Projektionszylinder. Wie schon von HEMMLEB et al. (2000) beschrieben, muss daher überlegt werden, ob ringförmige Flächensegmente verschiedener Radien

einzeln abgewickelt werden oder in einer Abwicklung mit einer beigefügten Maßstabslegende abgebildet werden sollen. Neben Tunnel, die in der Regel hauptsächlich aus zylindrischen Elementen bestehen, wären aus dem Bereich der Architektur Säulen, Bögen, Tonnengewölbe, Rundtürme und andere Rundbauten zu nennen.

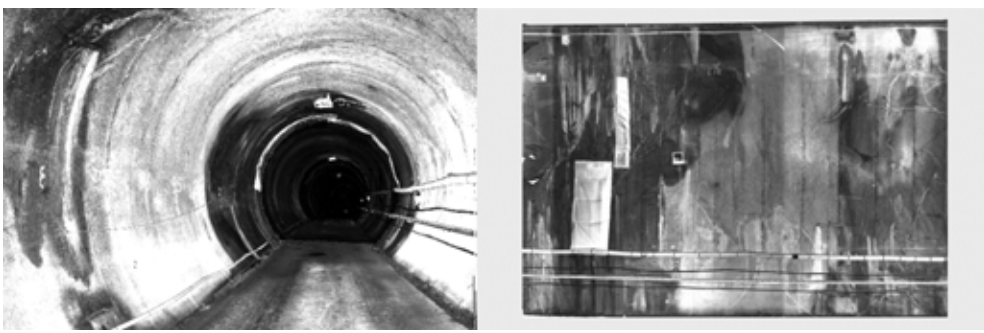


Abb. 5: Laserscan (links)**,** abgewickelte Tunneloberfläche (rechts)

4.5 Elliptisch-Zylindrische Abwicklung

Neben der Erstellungen von Bildplänen aus zylindrischen Orthophotos ist es möglich, Bauwerke aus elliptischen Grundformen in maßstäbliche Bildpläne abzuwickeln. Dabei ist anzumerken, dass analog zum zylindrischen Orthophoto der jeweilige Maßstab in Abwicklungsrichtung abhängig ist vom Abstand der dargestellten Oberfläche zur Projektionsfläche.

Abb. 6: Punktewolke der elliptischen Arkade

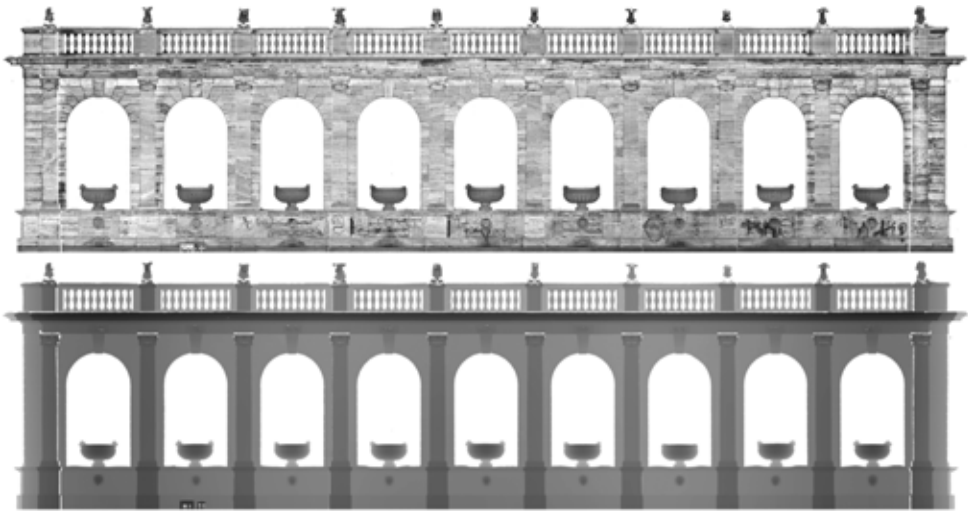


Abb. 7: Bildplan aus einer Elliptisch-Zylindrischen Abwicklung (oben), Punktewolke des Bauwerks und Tiefenbild (unten)

4.6 Abwicklungen zusammengesetzter Projektionen

Im Tunnelbau besteht das geplante Tunnelprofil oft aus mehreren gekrümmten und geraden Segmenten. Die daraus abgeleiteten Ebenen und Zylinder können als zusammengesetzte Projektionsoberfläche in einem Arbeitsschritt in einen Bildplan abgewickelt werden. Eine wichtige Anwendung ist die Erstellung von Profildifferenzen.

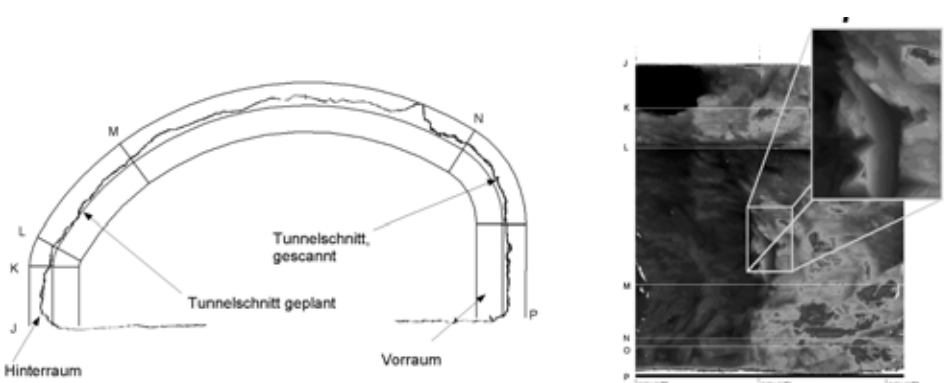


Abb. 8: Profilschnitt durch den Tunnel (links) , Profildifferenzen (rechts)

4.7 Messen in 2,5D

Die Orthophotos und Abwicklungen werden zunächst in ein LupoScan-Format abgelegt, in welchem zusätzlich die Z-Koordinate eines jeden Pixels verzeichnet ist. Es ist also möglich, die verschiedenen Funktionen, wie Schnitte, Vermaschungen usw., auf diese 2,5D-Datensätze anzuwenden.

Literatur

Hemmleb, M. ,Siedler G. & G. Sacher (2000): *Digitale Bildentzerrungen und -abwicklungen für die Anwendung in Denkmalpflege, Bauforschung und Restaurierung.* In: Von Handaufmaß bis High Tech, Interdisziplinäres Kolloquium, BTU Cottbus, 23.-26.02. 2000, Verlag Philipp von Zabern, Mainz 2001. 74-82

Luhmann, T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 306-308

Neitzel, F. (2006): *Gemeinsame Bestimmung von Ziel-, Kippachsenfehler und Exzentrizität der Zielachse am Beispiel des Laserscanners Z+F Imager 5003* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 174-183

Przybilla, H. -J. (2005): *Laserscanning in der As-Built-Dokumentation – Erfahrungen mit dem System Z+F Imager 5003* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 232-239

Vergleich von Anforderungen an 3D-Stadt- und Gebäudemodelle

Lars Fricke

Zusammenfassung

In komprimierter Form werden Anforderungen an 3D-Stadtmodelldaten und Datenhaltung für 3D-Stadtmodelle dargestellt. Insbesondere werden dabei Anwendungen im kommunalen Bereich mit Anwendungen in der Navigation verglichen

1 Kommunale Nutzung von 3D-Stadt- und Gebäudemodellen

1.1 Umweltanalysen

3D-Stadtmodelle sind für folgende Umweltanalysen zwingend, die zu den hoheitlichen Aufgaben einer Kommune zu rechnen sind:

- Lärmberechnungen gemäß EU Richtlinie 2002/49/EG
- Luftschadstoffanalysen gemäß MLuS 92 bzw. Ausbreitungsmodell nach TA Luft 2002
- Hochwassersimulationen

Umweltanalysen werden in der Regel mit hochkomplexen Algorithmen durchgeführt, die aus Gründen der Effektivität vereinfachende Annahmen für die Eingangsdaten machen. Beispielsweise wird bei Lärmberechnungen in der Regel der Einfluss von Dachflächen vernachlässigt, da diese Flächen durch die Abstrahlung von Schall nach oben nur einen geringen Einfluss auf die eigentliche Lärmbelastung haben. Ähnliche Vereinfachungen finden auch bei den anderen genannten Anwendungen statt. Da hoheitliche Aufgaben mit Daten durchgeführt werden müssen, die zu amtlichen Daten (z. B. ALK) konform sind und Umweltanalysen einen hohen Grad an Aktualität erfordern, ergeben sich folgende Anforderungen für die hierbei verwendeten 3D-Stadtmodell-Daten:

- Konformität mit der ALK
- Mindestens LOD1 (Blockmodell, KOLBE et al.)
- Aktualität

1.2 Stadtplanung

In der Stadtplanung eingesetzte 3D-Stadtmodelle müssen höheren Ansprüchen genügen. Sie werden in Kombination mit CAD-Planungsmodellen als Informations- und Entscheidungsgrundlage in politischen Gremien ebenso wie für Bürgerbeteiligungen genutzt. Die realistische 3D-Darstellung des Ensembles von Planung und Bestand erhöht die Entscheidungssicherheit in den Gremien ebenso wie die Akzeptanz beim Bürger. Wichtige Analysen sind:

- Analyse von Sichtlinien
- Analyse der Proportionen
- Analyse des optischen Eindrucks

Daraus und aus den bekannten Anforderungen für hoheitliche Aufgaben lassen sich die folgenden Kriterien für die Daten ableiten:

- Konformität mit der ALK
- Mindestens LOD2 (Dachmodell, KOLBE et al.)
- Texturen empfehlenswert
- Baumbestand (z. B. aus) empfehlenswert
- Aktualität

Aus der Forderung einer möglichst realistischen Visualisierung ergibt sich die Empfehlung, auch Vegetation und Straßenmöblierung in die Darstellung einzubeziehen. Das wesentlichste Element sind dabei aller Erfahrung nach Bäume. Eine Darstellung des Baumbestands kann aus Baumkataster, Luftbildern oder Laserscandaten mit Informationen über Typ, Höhe und Kronendurchmesser abgeleitet werden.

Abb. 1: 3D-Planungsmodell Neugestaltung Marktplatz der Kreisstadt Neustrelitz, Integration von Planung und Bestand (GTA Geoinformatik GmbH)

1.3 Stadtmarketing

Der Einsatz von 3D-Stadtmodellen im Stadtmarketing eröffnet neue Wege und Möglichkeiten der Präsentation gegenüber Investoren, Bürgern und Besuchern einer Stadt. Die Palette der bereits umgesetzten Lösungen reicht von Internetpräsentationen bis zu virtuellen Stadt-

spielen. 3D-Stadtpläne werden ebenso angeboten wie virtuelle Stadtansichten aus einem noch zu bauenden Bürohaus. Es versteht sich von selbst, dass solche Anwendungen eine hohe optische Qualität der Modelle und ein hohes Maß an realistischer Darstellung erfordern:

- Mindestens LOD2 (Dachmodell)
- Texturen (weitgehend fotorealistisch)
- Baumbestand
- Multimediafähigkeit (d. h. Datenformate zum Import in Multimedia-Softwarepakete)
- Aktualität

Abb. 2: 3D Computerspiel Bohkart (Bocholt, GTA Geoinformatik GmbH, FH Bocholt)

1.4 Anforderungen an die Datenerfassung

Aus den genannten Kriterien ergeben sich spezielle Anforderungen für die Datenerfassung. Dabei gilt: 3D-Daten sollten so genau wie möglich und so umfassend wie nötig erfasst werden. Beispielsweise sollte ein Blockmodell mit den Höhen der Dachkanten (oder wahlweise den exakten Traufhöhen) generiert werden und nach Möglichkeit nicht mit mittleren Dachhöhen. Dadurch erspart man sich Inkonsistenz mit detaillierteren Gebäudemodellen innerhalb desselben Stadtmodells.

Für eine Haltung innerhalb einer Datenbank bzw. für die Nutzung in GI-Systemen sind folgende Bedingungen zwingend, um eine konsistente Datenhaltung mit guter Möglichkeit zur Fortführung zu gewährleisten:

- Konformität mit der ALK
- Verknüpfung mit der ALK (z. B. über Gebäudeschlüssel, damit Änderungen in allen Datensätzen verfolgt werden können)

- Objektbildung (ein Gebäude besitzt eine eineindeutige ID und wird durch ein Objekt aus mehreren Elementen wie z. B. Flächen beschrieben)

Um mit GI-Systemen, Visualisierungs-Systemen und nicht zuletzt mit CAD-Systemen Daten austauschen zu können, sind weitere Kriterien unerlässlich:

- Semantische Korrektheit (z. B. Ausprägung von Dach- und Wandflächen)
- Flächenorientierung (Außenflächen müssen eine auswärts gerichtete Flächennormale besitzen

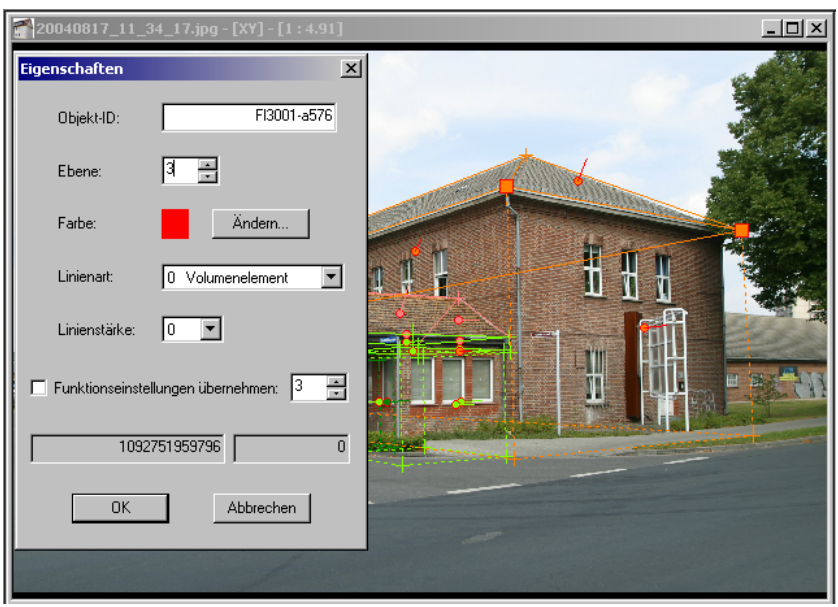


Abb. 3: Semantisch korrekte Modellierung (Screenshot tridicon™ ARCHITECTURE bzw. tridicon™ 3D, GTA Geoinformatik GmbH), Objektbildung mit Wand- und Dachflächen, korrekte Flächennormalen

Die Datengrundlage zur Modellierung von 3D-Stadtmodellen (Luftbilder, Laserscan, Digitalfotos) sollte folgenden nahe liegenden Kriterien genügen:

- Aktualität
- Gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis

Die effektivste Art der Generierung von detaillierten 3D-Stadtmodellen ist nach wie vor die Luftbildphotogrammetrie. Ein Dienstleister oder eine Kommune sollte ein Modellierungssystem verwenden, dass die Nutzung vorhandener Datenbestände erlaubt. In den überaus meisten Fällen sind das Luftbilder. Laserscandaten eignen sich hervorragend zur Generierung von LOD1-Modellen und zur Erstellung von Geländemodellen. Ebenso können Baumbestände daraus extrahiert werden. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass keine scharfen Kanten gemessen werden können (Bruchkanten, Dachkanten, ...) und somit auch nur mittlere Gebäudehöhen abzuleiten sind. Für Detailmodelle ist die Photogrammetrie

daher unverzichtbar. Aufgrund des vergleichsweise hohen Preises von Laserscan-Befliegungen (selbst wenn man den höheren Aufwand in der Auswertung von Luftbildern berücksichtigt) sind diese Daten eine gute Ergänzung, wenn sie bereits verfügbar sind. Zwingend erforderlich zur Erstellung eines 3D-Stadtmodells sind sie nicht.

1.5 Anforderungen an die Datenhaltung

Unabhängig von der Art der Datenerfassung muss für die Nutzung von 3D-Stadtmodellen eine Festlegung erfolgen, in welcher Weise die Daten gespeichert bzw. vorgehalten werden sollen. Hierbei befinden sich derzeit zwei Philosophien im Wettstreit:

- Die Speicherung von 3D-Modellen als implizite Geometrie:
  Gebäude werden als Grundrisse mit zusätzlichen Attributen wie Firstlinien, Höhenwerten, verbalcodierten Dachformen usw. gespeichert.
- Die Speicherung von 3D-Modellen als explizite Geometrie:
  Gebäude werden als volle 3D Geometrie mit allen semantischen Ausprägungen gespeichert.

1.5.1 Vor- und Nachteile impliziter Geometrie

Die Vorteile impliziter Geometrie beruhen im Wesentlichen darauf, dass bestehende Systeme (in Anlehnung an ALKIS/ATKIS) unkompliziert um einige Attribute erweitert werden können, ohne eine wirklich neue Datenstruktur zu erfordern. Die „Hemmschwelle“ zur Einführung eines dergestalt aufgebauten „2,5D-Stadtmodells“ ist vergleichsweise niedrig. Zusammengefasst ergeben sich folgende Vor- und Nachteile für die Verwendung impliziter Geometrie:

- Vorteile:
  - Geringer Speicherbedarf
  - Einfaches Datenschema
  - Als attributive Erweiterung von bestehenden Systemen möglich
- Nachteile
  - Komplexe Strukturen sind nicht abbildbar
  - Datenschema ist nicht auf echte 3D-Geometrie erweiterbar
  - Nutzung in anderen Systemen erfordert Erzeugung expliziter Geometrie

Implizite Geometrie ist somit für Anwendungen geeignet, die vereinfachte Geometrie erfordern (LOD 1 und einfaches LOD 2, z. B. Schallberechnungen), nicht für Anwendungen, die komplexe Geometrie erfordern (LOD 2 und höher, z. B. Stadtmarketing)

Datenbankschemen, die auf impliziter Geometrie basieren, sind nicht ausreichend erweiterbar und somit nicht zukunftssicher.

Abb. 4: Petersdom in Rom, nicht darstellbar mit impliziter Geometrie (GTA Geoinformatik GmbH)

1.5.2 Anforderungen an ein 3D-Datenmodell

Die Anforderungen an ein Datenmodell, das ein voll ausgebautes und skalierbares 3D-Stadtmodell unterstützt, müssen folgende Kriterien erfüllen:

- Objektorientierung
- Verknüpfung von Geometrie und Metadaten
- Datentechnische Beschreibung von unterschiedlichen Detaillierungsgraden
- Standardisierung
- Unterstützung von Semantik
- Exportmöglichkeiten für unterschiedliche Anwendungen wie z. B. VRML, DXF, SHAPE, ESRI Multi Patches, CityGML, ...

1.5.3 City GML als Austauschformat und als Datenschema

CityGML (KOLBE et al.) ist ein neuer Standard zur datentechnischen Modellierung von 3D-Stadt- und Geländemodellen. Gleichzeitig bildet CityGML ein umfassendes Austauschformat. CityGML ist derzeit Discussion Paper beim OGC. Ziel der Einführung von CityGML ist:

- Datenquellen-unabhängiger Datenaustausch von 3D-Stadt- und Regionalmodellen
- Syntaktische Interoperabilität:
  - CityGML kann von GML Readern gelesen werden
  - Semantische Interoperabilität durch einheitliche Definitionen von Objekten, Attributen und ihren Beziehungen
- Flexibilität durch Berücksichtigung verschiedener Anforderungsprofile, wie z. B. Unterstützung unterschiedlich detaillierter Modelle (Definition verschiedener Levels-of-Detail (LOD))
- Ableitung unterschiedlicher LODs nach Anforderung
- Haltung unterschiedlicher Modell-Instanzen

- Unterstützung von Objekt-Semantik und Fachdaten in GI-Systemen
- Gültige Volumenbeschreibungen (z. B. von durchbrochenen Volumina – „Haus mit Tür“) ermöglichen analytische Berechnungen.
- Anwendungs-spezifische Erweiterungen durch Ableitungen der CityGML-Klassen sind möglich
- Gute Aktualisierbarkeit durch Erhalten von Struktur und Semantik von Objekten
- Bezüge zu externen Datenquellen, z. B. ALKIS, CAD-Architekturmodellen etc.

Ausführliche Informationen zu CityGML finden sich unter www.citygml.org.

2 Anforderungen an 3D-Modelle für die Navigation

Ein zunehmend interessanter werdender Anwendungsraum für 3D-Stadtmodelle ist die Navigation. Der enorme Bedarf an qualitativ hochwertigen 3D-Daten in diesem Sektor führt dazu, dass auch kommunale Träger diesen Markt bei der Bereitstellung von 3D-Stadtmodellen nicht übersehen sollten.

Abb. 5: Navigationsmodell einer Ferienanlage in Phoenix, USA (GTA Geoinformatik GmbH)

Die Anforderungen an ein 3D-Stadtmodell für die Navigation entsprechen weitgehend denen, die bereits für das Stadtmarketing beschrieben wurden (die Hersteller von Navigationsdaten gehen damit über die Forderungen von COORS et al. hinaus). Es müssen allerdings folgende zusätzliche Bedingungen erfüllt sein:

- Geometrische Konsistenz mit Navigationsdaten (Straßendatenbanken)
- Geringes Datenvolumen (z. B. ~100 kB für herausragende Einzelgebäude)
- Geringe Texturlast bei der Visualisierung

Für die Kommunen ergeben sich daraus folgende Folgerungen:

- Die Konsistenz von Navigationsdaten und ALK kann nicht vorausgesetzt werden. Anpassungen sind erforderlich.
- Flächendeckende Texturen hoher Qualität und mit niedrigem Datenvolumen sind zwingend erforderlich.
- Eine für Navigation optimierte Geometrie muss aus den vorhandenen Daten abgeleitet werden (Deduktion relevanter Geometrieelemente zur Verringerung von Datenvolumen)
- Wichtige Gebäude müssen in detailliertem LOD2 vorliegen.
- Eine Datenbasis, die sich vollständig auf implizite Geometrie beschränkt, ist nicht ausreichend.

Abschließend lässt sich sagen:

- Kommunale 3D-Daten sind grundsätzlich geeignet, um an die Navigationsindustrie abgegeben zu werden.
- Die kommunalen Träger benötigen ein Geschäftsmodell für die Nachnutzung ihrer Daten (zentrale Koordinationsstellen als Ansprechpartner für die Firmen sind wünschenswert).
- Fachfirmen mit enger Verbindung zur Navigationsindustrie stehen bereit, um kommunale Daten dem Bedarf der Navigationsindustrie anzupassen.

Literatur

Altmaier, A. & T. H. Kolbe (2003): *Applications and Solutions for Interoperable 3d Geo-Visualization.* Photogrammetric Week 2003, 1.-5.09.2003, Stuttgart, Germany

Coors, V., Elting, C., Kray, C. & K. Laakso (2005): *Presenting Route Instructions on Mobile Devices – From Textual Directions to 3D Visualization.* In: Dykes, J., MacEachren, A. & M.-J. Kraak (Eds.): Exploring Geovisualization, Elsevier, Amsterdam. 529-550

Kolbe, T. H., Gröger, G. & L. Plümer (2005): *CityGML.* International Symposium on Geoinformation for Disaster Management, Delft, Niederlande, 21.-23.03.2005

Kolbe, T. H. & G. Gröger (2003): *Towards Unified 3D City Models,* ISPRS Comm. IV Workshop "Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II", 8.-9.09.2003, Stuttgart, Germany

Terrestrische Laserscanner zur Untersuchung von Wäldern als Jagdlebensräume für Fledermäuse

Tobias ASCHOFF, Marc W. HOLDERIED und Heinrich SPIECKER

Zusammenfassung

Fledermäuse, insbesondere Waldfledermausarten wie die Mopsfledermaus, gehören zu den bedrohten Tierarten. Um sie gezielter schützen zu können, werden Kenntnisse über ihre Anforderungen an Jagdlebensräume benötigt. Um die Nutzung von Wäldern als Jagdlebensraum zu untersuchen, wird in dieser Ausarbeitung eine kombinierte Auswertung des Flugverhaltens der Tiere und terrestrischer Laserscans der Lebensräume durchgeführt.

Zu Beginn der Auswertung steht die Verschneidung von Fledermausflugbahnen mit den Laserdaten. Darauf aufbauend werden Schnitte zur Ermittlung von Abstandsdaten der Fledermäuse zum Bewuchs durch die Scandaten gelegt. Für eine weitergehende Auswertung werden die Scandaten in einen Voxel-Raum regelmäßig angeordneter Würfel transformiert. Durch die Wahl des Parameters Reflexionswahrscheinlichkeit ergibt sich die Möglichkeit; den gescannten Raum in beobachtete und unbeobachtete (verdeckte) Bereiche zu klassifizieren. Die beobachteten Bereiche werden wiederum in offene und mit Objekten erfüllte Räume aufgeteilt. Diese Differenzierung ermöglicht eine Quantifizierung des zur Verfügung stehenden Flugraumes.

1 Einleitung

Der Wald als Lebensraum für viele Tierarten erfährt durch die fortwährende Nutzung durch den Menschen starke Veränderungen. Es ist festgestellt worden, dass der Fortbestand vieler Fledermausarten in Mitteleuropa gefährdet ist. Zum effektiven Schutz dieser Tiere ist die Notwendigkeit von ausreichendem Quartier- und Nahrungsangebot erkannt worden. Die Auswirkungen des Fehlens geeigneter Waldstrukturen im Jagdlebensraum wurden bisher jedoch nicht umfassend untersucht. Aus diesem Grund ist festzustellen; auf welche Waldstrukturen Fledermäuse für die Jagd angewiesen sind, um diese Strukturen dauerhaft vorzuhalten oder auch erst zu schaffen.

Fledermäuse senden während des Fluges wiederholt Ultraschall-Ortungslaute aus, fangen zurückkehrende Echos mit den Ohren auf und können damit ihre Umwelt wahrnehmen. Das dreidimensionale „Hörbild“ wird von den Fledermäusen verwendet, um Nahrung zu suchen und sich zu orientieren. Verschiedene Fledermausarten erzeugen charakteristische Signale mit oft arttypischen Frequenzen (SCHOBER & GRIMMBERGER 1998). Aufgezeichnete Fledermausrufe können somit zum Ansprechen der Arten verwendet werden.

Im bayerischen Forstamt Ebrach im Distrikt X in den Abteilungen 5, 6 und 7 wurden zur Untersuchung der Jagdlebensräume Beobachtungsflächen mit erhöhter Fledermausaktivität angelegt. Erfasst wurden auf diesen Flächen neben der Fledermausaktivität die Waldstrukturen mittels terrestrischer Laserscanner.

2 Beobachtung der Fledermäuse

In dieser Arbeit wurden zwei Methoden zur Erfassung fliegender Fledermäuse eingesetzt, die beide auf der akustischen Aufnahme der Ultraschall-Ortungslaute beruhen. Die erste Methode unterteilt die Fledermausaktivität in verschiedene Höhenstufen. Dazu dient eine Mikrofonkette, die aus über 30 m Höhe von einer an einem Baum befestigten Teleskopstange senkrecht frei im Raum hängt. Die acht Mikrofone sind im Abstand von je 5 m an der Kette angebracht. Durch die unterschiedlichen Distanzen der Fledermaus während des Rufes zu den Mikrofonen erreicht ein Ortungsruf jedes Mikrofon zu einer anderen Zeit. Aus diesen Laufzeitdifferenzen berechnen sich die relative Höhe und der radiale Abstand der Fledermaus zur Kette und die Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der Höhe.

Als zweite Erfassungsmethode wurden zwei Mikrofon-Arrays verwendet. Mit diesen können die Flugbahnen hoch aufgelöst im dreidimensionalen Raum erfasst werden. Jedes Array besteht aus vier symmetrisch angeordneten Mikrofonen. Die relative Position der beiden Arrays zueinander wird beim jeweiligen Aufbau ermittelt. Wie auch bei der Mikrofonkette erreicht ein Ortungsruf der Fledermaus jedes Mikrofon zu einer anderen Zeit. Wegen der räumlichen Anordnung der Mikrofone wird die Berechnung der 3D-Position der Fledermaus zum Zeitpunkt jedes Rufes möglich. Die resultierende Polygonlinie aus Einzelortungen beschreibt den dreidimensionalen Verlauf des Fluges (HOLDERIED & VON HELVERSEN 2003).

Für die spätere Zusammenführung der Flugbahnen mit den Daten der Umgebung wurden Holzpflöcke dauerhaft angebracht. Die Distanzen der Mikrofon-Arrays zu den Holzpflöcken wurden bei jedem Aufbau der Arrays vermessen. Die Höhendifferenz der Arrays wurde zu einer Referenz Höhenmarke mit einer Schlauchwaage aufgenommen.

3 Scanaufnahmen

Im Projektgebiet wurde umfassend die Aktivität der Fledermäuse untersucht. Darauf aufbauend wurden acht Versuchsflächen ausgewählt, die eine erhöhte Fledermausaktivität aufweisen. Diese Flächen wurden mit einem terrestrischen Laserscanner aufgenommen. Verwendet wurde der Panorama Laserscanner IMAGER 5003 von Zoller + Fröhlich mit dem Lasermesssystem LARA 53500. Das Messsystem arbeitet mit dem Phasendifferenzprinzip zur Entfernungsmessung und hat einen Eindeutigkeitsbereich von 53,5 m. Gescannt wurde im High Resolution Modus mit einer Auflösung von 10.000 × 500 Scanpunkten pro Scan (ZOLLER+FRÖHLICH 2005).

Pro Versuchsfläche wurden zwischen vier und neun Laserscans aufgenommen. Die Anzahl und Abstände der Scans auf einer Fläche richteten sich nicht nur nach der Größe des Untersuchungsgebietes, sondern auch nach der Dichte des vorherrschenden Baumbestandes und Verdeckungen der Flugkorridore der Fledermäuse.

Zur Registrierung der Laserscans wurden künstliche Papiertargets verwendet. Die Targets wurden für die Scanaufnahmen temporär angebracht und tachymetrisch vermessen. (THIES et al. 2003) Die Verschneidung der Scandaten mit den Flugbahnen der Mikrofon-Arrays erfolgte über die tachymetrisch vermessenen Holzpflöcke.

4 Auswertung der Fledermaus- und Scandaten

Die Verknüpfung der Flugbahnen mit den Scandaten erfordert, dass beides im gleichen Koordinatensystem vorliegt. Zur Überführung der Flugbahnen in die Scandaten wurde die Helmert-Transformation gewählt. Die angebrachten Holzpflöcke der Versuchsflächen dienen als identische Punkte im Start- und Zielsystem der Transformation. Die Koordinaten der Holzpflöcke im Flugkoordinatensystem sind als ausgeglichenes Streckennetz aus den Distanzen zu den Mikrofonarrays berechnet worden. Die Koordinaten im Scankoordinatensystem resultieren aus der tachymetrischen Vermessung zur Registrierung der Scans.

Zur Datenauswertung wurden Schnitte durch die Scandaten gelegt und Raummodelle erstellt. Die Schnitte wurden dabei so gewählt, dass das Abstandsverhalten der Fledermäuse während des Fluges ermittelt werden kann. Die Raummodelle setzen die aufgezeichnete Fledermausaktivität in den räumlichen Kontext des Waldes und ermöglichen die Darstellung des vorhandenen Flugraumes.

Zur Berechnung der Schnitte werden die Scandaten gefiltert. Dabei wird versucht, fehlerhafte Punkte aus dem Datensatz zu eliminieren, mit dem Ziel, nur noch Scanpunkte auf der Oberfläche von Objekten (Objektpunkte) zu belassen. Die Fehlpunkte resultieren aus Lasermessungen auf Objekten, außerhalb des ersten Eindeutigkeitsbereiches, Laserdistanzmessungen an Kanten von Objekten sowie aus Lasermessungen, die überhaupt keinen Reflexionspunkt erreichen. Zur Filterung wird die Software *Z+F LaserControl* verwendet (ZOLLER+FRÖHLICH 2005).

Die Raummodelle werden ebenfalls aus den Punkten berechnet, die auf den Objektoberflächen liegen. Zusätzlich fließen allerdings die Lasermessungen ein, die nicht von Objekten im ersten Eindeutigkeitsbereich reflektiert werden (Luftpunkte). Diese Messungen können in den offenen Luftraum zeigen oder auch zu Objekten reichen, die weiter entfernt sind als der Eindeutigkeitsbereich lang ist. Sie haben die Eigenschaft einer geringen Intensität des aufgenommenen Laserlichtes und werden unter Verwendung eines einfachen Schwellwertes extrahiert.

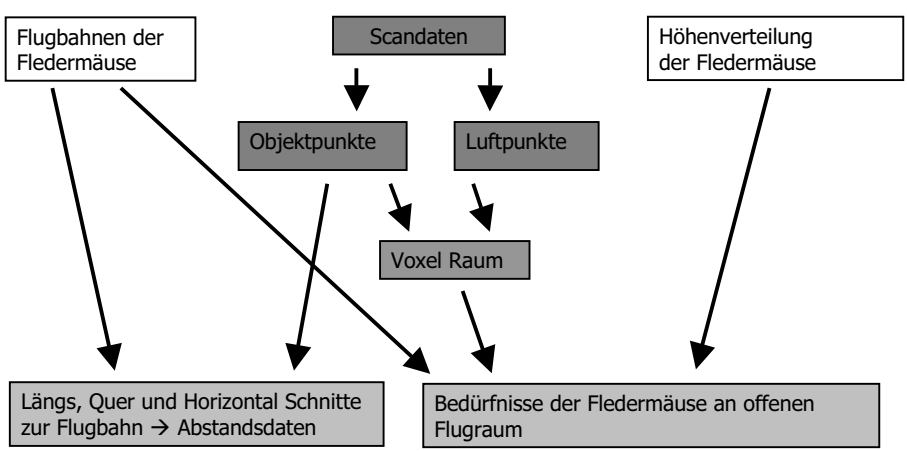


Abb. 1: Übersicht über die Datenauswertung

4.1 Schnitte durch Scandaten

Die Flugbahnen der Fledermäuse liegen als dreidimensionale Polygonlinien vor. Jeder Polygonpunkt markiert den jeweiligen Aussendeort eines Rufes. Für jeden Polygonpunkt einer Flugbahn wird der Flugvektor $\overrightarrow{FV}$ ermittelt. Er zeigt von der momentanen Position zum nachfolgenden Punkt der Flugbahn. Die Flugrichtung $\overrightarrow{FR}$ entspricht dem Flugvektor mit 0 als Wert der Z-Koordinate. Die Zenitrichtung ist als Vektor $\overrightarrow{ZR} = (0 \quad 0 \quad 1)^T$ definiert.

Durch jeden Polygonpunkt einer Flugbahn werden drei Schnitte gelegt. Die Schnittebenen liegen horizontal (aufgespannt durch $\overrightarrow{FR}$ und $\overrightarrow{ZR} \times \overrightarrow{FR}$), vertikal längs (aufgespannt durch $\overrightarrow{ZR}$ und $\overrightarrow{FR}$) und vertikal quer (aufgespannt durch $\overrightarrow{ZR}$ und $\overrightarrow{ZR} \times \overrightarrow{FR}$) zur Flugrichtung der Fledermaus. Der Ursprung jeder Schnittebene ist so gewählt, dass die Fledermaus im Zentrum des Schnittbildes liegt.

Zur Ermittlung des Abstandsverhaltens der Tiere werden in den Schnitten Kreissegmente von der Fledermausposition aus aufgespannt. Die Segmente haben einen Öffnungswinkel von 45 Grad und sind in Flugrichtung ausgerichtet. Für jedes dieser Segmente wird der minimale Abstand zu vorhandenen Scanpunkten berechnet. Im Vertikalschnitt quer wird von diesen Segmenten abgewichen und lediglich der minimale radiale Abstand um die Fledermausposition ermittelt.

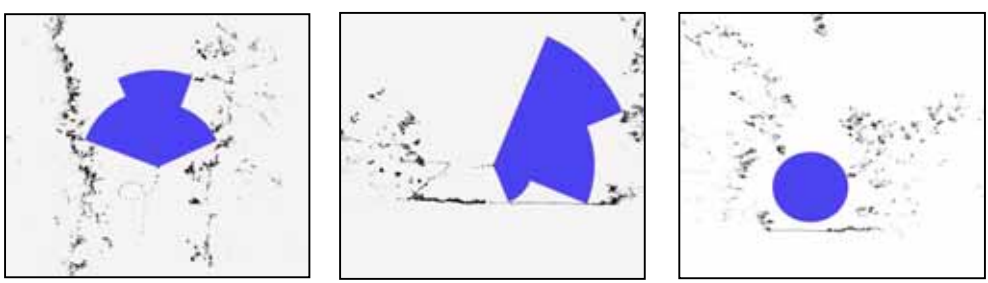


Abb. 2: Links: Horizontalschnitt. Mitte: Vertikalschnitt längs zur Flugrichtung. Rechts: Vertikalschnitt quer zur Flugrichtung. Im Horizontalschnitt und im Vertikalschnitt längs sind jeweils drei Segmente mit einem 45 Grad Öffnungswinkel in Flugrichtung angeordnet. Für jedes Segment wird der minimale Abstand zu den Scanpunkten ermittelt. Im Vertikalschnitt quer wird der minimale Abstand radial ermittelt.

4.2 Transformation der Scandaten in Voxel-Räume

Ein Voxel-Raum ist ein räumlich fest abgegrenzter Bereich, der mit aneinander grenzenden Würfeln (Voxel) gefüllt ist. Alle Würfel haben eine konstante Kantenlänge. Der Voxel-Raum wird in einem dreidimensionalen Array angelegt. Der räumliche Bezug der einzelnen Voxel erfolgt über die Indizes i, j und k. (GORTE & WINTERHALDER 2004) Für jeden Voxel werden die Parameter Trefferanzahl $n_{Hits}(ijk)$, Fehlschussanzahl $n_{Miss}(ijk)$ und Reflexi-

onswahrscheinlichkeit $P_{Ref}(ijk)$ ermittelt. Bei der Instanzierung des Voxel Arrays wird für die Trefferanzahl und die Fehlschussanzahl der Wert 0, für die Reflexionswahrscheinlichkeit der Wert –1 genommen.

Während des Durchlaufs durch die Liste aller Lasermessungen wird festgestellt, in welchem Voxel der jeweilige Objektpunkt liegt. Der Parameter Trefferanzahl des zugehörigen Voxels wird dabei um eins inkrementiert. Auf dem Weg der Lasermessung vom Scanner zum Reflexionspunkt werden Voxel überstrichen. Für alle überstrichenen Voxel wird der Parameter Fehlschussanzahl um eins inkrementiert. Die Messungen zu den „Luftpunkten" bedürfen einer besonderen Verarbeitung, da die gescannte Distanz zwar nicht aussagekräftig, die Raumrichtung jedoch eindeutig ist. In der Richtung der Messung werden die überstrichenen Voxel bis zum Eindeutigkeitsbereich ermittelt und der Parameter Fehlschussanzahl der überstrichenen Voxel um 1 inkrementiert. Die „Luftpunkte" dürfen nicht in die Erstellung des Parameters Trefferanzahl einfließen.

Zur Berechnung der Reflexionswahrscheinlichkeit wird ein vereinfachter Ansatz aus der Erstellung von Karten mittels mobiler Roboter verwendet (HÄHNEL et al. 2003). Dazu werden die Parameter Trefferanzahl und Fehlschussanzahl verwendet (Formel 1).

$$P_{Ref}(ijk) = \frac{n_{Hits}(ijk)}{n_{Hits}(ijk) + n_{Miss}(ijk)} \tag{1}$$

5 Diskussion

Die Ermittlung von Abstandsdaten der Fledermäuse zum Bewuchs erfolgt über die Bildung von Schnitten durch die Scandaten. Darin werden für ausgewählte Segmente die minimalen Abstände berechnet. Aufgeschlüsselt auf die verschiedenen Fledermausarten wird das artspezifische Abstandsverhalten untersucht. Aus den minimalen, maximalen und mittleren Abständen der verschiedenen Arten werden Flugkorridore abgeleitet.

Die Abstandsdaten werden weiterhin verwendet, um zu untersuchen, ob sich die Fledermäuse an bestimmten Strukturen orientieren. Die „Distance of Focus"-Theorie besagt, dass frequenzmodulierende Fledermäuse durch die Wahl ihrer Rufparameter ihre fluginduzierte Ortungsfehler so wählen, dass Objekte in einer bestimmten Distanz optimal wahrgenommen werden können (BOONMAN et al. 2003). Diese akustische Fokussierung ist vergleichbar mit dem optischen Fokussieren des Menschen. Die ermittelten Abstandsdaten werden zur Überprüfung dieser Theorie verwendet.

Die Reduzierung der gescannten Informationen auf die Schnitte lässt einen Großteil der ursprünglichen Informationen der Laserscans unberücksichtigt. Weiterhin kann in den Schnitten keine Aussage dazu erfolgen, ob alle Objekte darin abgebildet sind. Es wurde versucht, durch die geeignete Wahl der Scanneraufbauten Verdeckungen und Abschattungen gering zu halten und alle relevanten Objekte zu erfassen. In den höher gelegenen Bereichen der Baumkronen ist dies jedoch nicht immer möglich. Aus diesem Grund wird die Auswertung auf die Erstellung eines Raummodells erweitert. Das Raummodell wird durch den Voxel-Raum mit den bereits beschriebenen Parametern definiert. Ziel ist die Differenzierung in unbeobachtete Bereiche, in Bereiche des offenen Luftraums und in Bereiche mit Objekten. Als Ausgangspunkt für die Berechnung wird der komplett unbeobachtete Raum

angenommen. Die Reflexionswahrscheinlichkeit aller Würfel wird somit als Startwert auf –1 gesetzt.

Abb. 3: Voxel-Raum der Beobachtungsfläche „Zerfallsphase“ (20 × 20 × 33 m). Die Kantenlänge der Voxel beträgt 10 cm. Dargestellt sind die Voxel mit $P_{Ref} > 0$ und $n_{Hits} > 10$. In den Schnitten auf der rechten Seite sind die offenen Voxel Weiß, die mit Objekten gefüllten Voxel Schwarz und die unbeobachteten Voxel Rot dargestellt. Der untere Schnitt befindet sich 2,6 m über dem Gelände. Der obere Schnitt befindet sich 31,1 m über dem Gelände. (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

Bei der Transformation der Scandaten in den Voxel-Raum erhalten die beobachteten Voxel Werte für die Reflexionswahrscheinlichkeiten zwischen 0 und 1. Ein Voxel mit der Reflexionswahrscheinlichkeit gleich 0 wird nur von Lasermessungen durchschossen und weist keinen Treffer auf. Diese Voxel werden als offen klassifiziert. Diese Klassifikation ist fehlerhaft für kleine Objekte, die nicht im Scan erkannt werden, und Objekte, die durch davor liegende Hindernisse verdeckt sind. Die Voxel mit einer Reflexionswahrscheinlichkeit größer 0 werden als geschlossen klassifiziert. Diese Voxel beinhalten mindestens einen Reflexionspunkt. Die Reflexionswahrscheinlichkeit ist gleich 1, wenn es nur noch Treffer und keine Durchschüsse gibt. Die Verwendung weiterer Parameter kann die Klassifizierung in offen und geschlossen verbessern.

Der unbeobachtete Raum besitzt als Reflexionswahrscheinlichkeit den Wert –1. Dort ist nicht bekannt, ob diese Bereiche offen sind oder Objekte beinhalten. In Abbildung 3 (Beobachtungsfläche „Zerfallsphase“) ist in Höhe des Scanners lediglich das Schaftinnere der Bäume unbeobachtet. In ca. 30 m über dem Scanner existieren nur geringe unbeobachtete Bereiche in der Baumkrone. Dagegen sind in Abbildung 4 (Beobachtungsfläche „Waldrand“) große Bereiche hinter der dichten Blätterwand unbeobachtet. Es ist zu erkennen, dass der Anteil unbeobachteter Raum nicht nur vom Aufbau des Scanners abhängt, sondern auch maßgeblich von der Dichte der Wald- und Belaubungsstruktur.

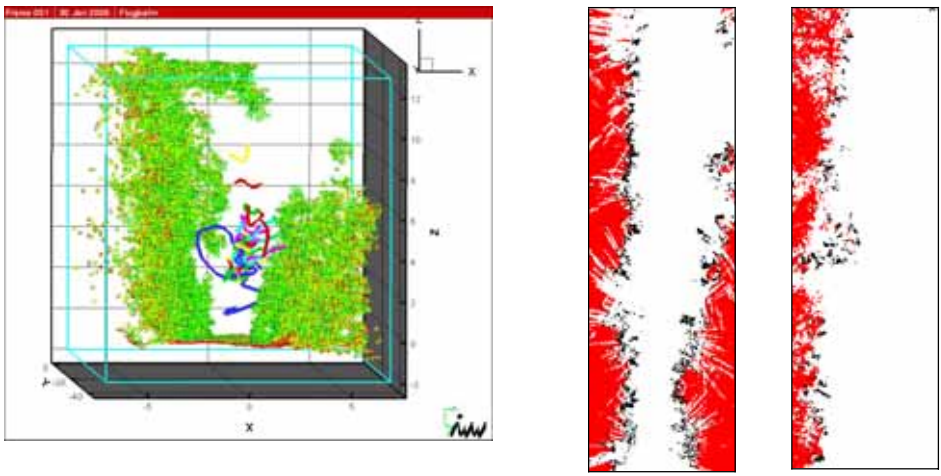


Abb. 4: Voxel-Raum der Beobachtungsfläche „Waldrand“. Links: Dreidimensionale Abbildung mit Waldrand (links), Weg und Büschen (rechts) (14 × 45 × 15 m). Über dem Weg hängt ein großer Eichenast. Flugbahnen von Fledermäusen sind über dem Weg in unterschiedlichen Farben eingeblendet. Mitte: Horizontalschnitt durch den Voxel-Raum 2,4 m über dem Gelände. Rechts: Horizontalschnitt durch den Voxel-Raum 9,0 m über dem Gelände. In beiden Schnitten sind die offenen Voxel Weiß, die mit Objekten gefüllten Voxel Schwarz und die unbeobachteten Voxel Rot dargestellt. (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

Auf der Wegoberfläche ist eine Musterbildung der Reflexionswahrscheinlichkeit zu beobachten (Abb. 5 links). Diese resultiert aus der Lage des Voxel Arrays in Bezug zur Lage der Wegebene und der Richtung der Lasermessung. Die Ausprägung der Muster hängt vom Zusammenspiel aller drei Einflussfaktoren ab. Dort wo die Oberfläche des Weges mit der Oberkante des Voxel zusammenfällt, können keine Fehlschüsse auftreten. Mit Abnahme der Geländehöhe wird die Anzahl der möglichen Fehlschüsse größer. Dies geht soweit bis die Geländeoberfläche auf Höhe der Voxel-Unterkante liegt. In diesem Fall sind nur noch Durchschüsse möglich (Abb. 5 rechts). Letztendlich ist die Scanrichtung entscheidend, ob es tatsächlich Durchschüsse gibt.

Für eine Klassifizierung der gefüllten Voxel wäre es ideal, wenn die Reflexionswahrscheinlichkeit verwendet werden könnte. Es wäre vorstellbar, dass ein geschlossener Körper (z. B. Baumschaft) eine hohe und ein durchlässiger Körper (z. B. Baumkrone) eine niedrige Reflexionswahrscheinlichkeit hat. Die erstellten Modelle entsprechen jedoch nicht dieser Idealvorstellung. Zum Beispiel ergeben sich auf der Unterseite von Ästen tendenziell geringere Reflexionswahrscheinlichkeiten als an deren Oberseite. Diese lageabhängige Verteilung der Reflexionswahrscheinlichkeit ist mit der Punktverteilung der Laserdaten innerhalb eines durchlässigen Körpers zu erklären. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Anzahl der Fehlschüsse ab, wodurch sich das Verhältnis Fehlschuss- und Trefferanzahl in Richtung Trefferanzahl verschiebt. Auf der Schaftoberfläche wird der gesamte Wertebereich der Reflexionswahrscheinlichkeit (0 bis 1) abgedeckt. Dieses ist, wie bei der Musterbildung auf dem Weg, auf die Lage des Arrays in Bezug zur Lage der Oberfläche und der Scannrichtung zurückzuführen. Hinzu kommt als weiterer Einflussfaktor die Krümmung der Schaftoberfläche. Um eine gesicherte Klassifizierung der gefüllten Voxel durchführen zu können,

wird die Aufnahme weiterer Parameter notwendig. Vorstellbar wäre ein Flächenindex abgeleitet aus den Laserbildern, der die Größe oder Struktur der gescannten Flächen beschreibt.

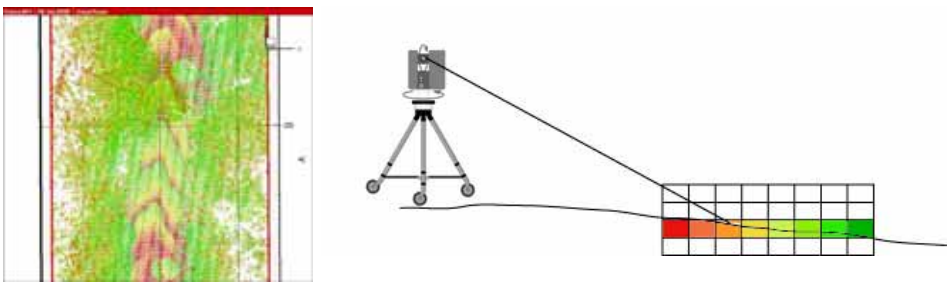


Abb. 5: Links: Aufsicht auf Waldweg mit angrenzender Vegetation. Auf dem leicht abfallenden Waldweg kommt es zu regelmäßigen V-förmigen Mustern wechselnder Reflexionswahrscheinlichkeit (farbig kodiert). Rechts: Der Verlauf des Musters erklärt sich aus dem Zusammenspiel von der Lage des jeweiligen Voxels, der Lage der Wegebene und der Richtung der Lasermessung. (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

6 Danksagung

Diese Ausarbeitung entstand aus dem Projekt „Forstliche Maßnahmen zur Verbesserung von Jagdlebensräumen von Fledermäusen“. Das Projekt wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt finanziell unterstützt (AZ 22437). Für die Erfassung und Bereitstellung der Daten zur Fledermausaktivität danken wir insbesondere Ulrich Marckmann, Peter S. Reh und Volker Runkel.

Literatur

Boonman, A. M., Parsons, S. & G. Jones (2003): *The influence of flight speed on the ranging performance of bats using frequency modulated echolocation pulses.* J Acoust Soc Am. 2003 Jan; 113(1). 617-28

Gorte, B. & D. Winterhalder (2004): *Reconstruction of Laser-Scanned Trees Using Filter Operations in the 3D Raster Domain.* International Archives of Photogrammetry , Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 8/W2

Hähnel, D., Triebel, R., Burgard, W. & S. Thrun (2003): *Map Building with Mobile Robots in Dynamic Environments.* In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Taipei, Taiwan

Holderied, M. W. & O. von Helversen (2003): *Echolocation range and wingbeat period match in aerial-hawking bats.* Proc. R. Soc. Lond. B 270. 2293-2299

Schober, W. & E. Grimmberger (1998): *Die Fledermäuse Europas. Kennen, bestimmen, schützen.* Kosmos Naturführer. Franckh-Kosmos Verlag

Thies, M., Aschoff, T. & H. Spiecker (2003): *Terrestrische Laserscanner im Forst.* In: AFZ-derWald. 22/2003

Zoller+Fröhlich (2005): www.zf-laser.com (accessed 01.12.2005)

Erfassung, Analyse und Modellierung des Futuro-Hauses von Matti Suuronen

Katharina RATKE

Zusammenfassung

2004 bereitete die Neue Sammlung des Staatlichen Museums für Angewandte Kunst in der Pinakothek der Moderne in München ein Projekt zur Untersuchung, Dokumentation und Konservierung des sich in Berlin befindlichen originalen Futuro-Hauses (Abb. 1) vor. Da das Futuro-Projekt nur über Sponsorenmittel finanziert wird, wurden die Fachhochschule Köln für die materialtechnologische, restauratorische und konservatorische Untersuchungen und Maßnahmen sowie die Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie, Vorstand Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas A. Wunderlich, für die Vermessungsarbeiten mittels Lasertechnologie in Form einer Diplomarbeit (RATKE 2006) in das Projekt eingebunden, um anhand der aufgenommenen digitalen Daten Verformungen und Schäden, die am Futuro im Laufe der Jahre aufgetreten sind, nachzuweisen und zu dokumentieren. Die geometrische Form des Futuro war zu bestimmen und ein dreidimensionales Modell des Hauses sollte entstehen, welches als Vorlage für die Schadensbemaßung und -kartierung dienen und dem Betrachter außerdem eine bessere Vorstellung vom Futuro-Haus ermöglichen sollte.

Abb. 1: Futuro, Berlin

1 Allgemeines über Futuro

Futuro wurde im Jahre 1968 von dem finnischen Architekten Matti Suuronen entworfen und sollte ursprünglich als Skihütte oder Ferienhaus genutzt werden. Der hellgraue Prototyp wurde am 1. April 1968 von der finnischen Firma Polykem Ltd. hergestellt. Er hatte die Form eines abgeplatteten Ellipsoids, welcher auf einem Stahlfundament, bestehend aus einem Torus und vier an ihm befestigten rohrartigen Beinen, auflag. Die Futuro-Schale war eine Sandwich-Konstruktion aus mit Glasfaser verstärktem Kunststoff für die Innen- und

Außenwand und Polyurethan-Schaum als Isolationsmaterial dazwischen. Das Futuro bestand aus 16 Segmenten, acht davon bildeten das Dach, aus den restlichen acht Teilen wurde die untere Hälfte des Hauses zusammengesetzt. Die oberen Segmente enthielten insgesamt 16 doppelschichtige Fenster aus Acryl. Fenster in unteren Segmenten waren nur als mögliche Option vorgesehen. Eins von den unteren Segmenten enthielt eine nach unten aufklappbare Tür, die zur Treppe wird. Wegen seiner Stahlbeine, die mit unterschiedlicher Länge gefertigt werden konnten, konnte das Futuro leicht und ohne massive Eingriffe in die Natur, in jedem Gelände installiert werden.

Der Prototyp beinhaltete einen Wohn- und zwei Schlafräume, eine Kitchenette, ein Badezimmer mit Toilette sowie einen Vorraum mit Garderobe. Die Inneneinrichtung wurde speziell für das Ferienhaus entworfen. Zur Standardausstattung im Wohnbereich gehörten z. B. sechs spezielle Stühle, die die Möglichkeit boten, sie zu Betten auszuklappen. Eine Kombination aus Kamin und Steinplatte war Heizung und Grill in einem. Eine wichtige Besonderheit von Futuro war, dass man mithilfe von Trennwänden den Innenraum flexibel gestalten konnte, indem man zusätzliche temporäre „Gästezimmer“ schuf.

Das moderne Ferienhaus aus Kunststoff hatte einen Durchmesser von 8 Metern, war 4 Meter hoch und hatte bei 25 m² Bodenfläche einen Nutzraum von 140 m³. Sein Gewicht ohne die Einrichtungsgegenstände betrug 2500 Kilogramm, das Gesamtgewicht mit Standardausstattung belief sich auf 4 Tonnen. Diese technischen Angaben sind jedoch keinesfalls exakt, denn es existieren keine Detailpläne mehr, die die genauen Maßangaben enthalten würden. Das Futuro bot Platz für bis zu acht Personen. Die Gesamtzahl der produzierten Futuros wird auf ca. 60 Stück geschätzt (HOME & TAANILA 1998).

2 Messung

Unter Berücksichtigung des Messbereiches des lehrstuhleigenen Laserscanners HDS2500, welcher 40°× 40° beträgt, wurden die Scannerstandpunkte ausgesucht und die durchnummerierten Zielmarken am Futuro-Rumpf und seinem Stahlgestell angebracht. Für die Innenraumaufnahmen stand der Panorama-Laserscanner HDS3000[1], dessen Sichtfeld in horizontaler Richtung 360°, in vertikaler 270° beträgt, zur Verfügung. Die Scannerstandpunkte wurden nach den gleichen Kriterien ausgewählt wie im Außenbereich. Als Zielmarken wurden zusätzlich Kugeln verwendet.

Es wurden 42 schwarz-weiße Papierreferenzmarken, 16 reflektierende Kunststoffziele und 4 Kugeln als Tie-Points verwendet. Futuro wurde von 21 Standpunkten aus aufgenommen, 9 Aufstellungen im Innen- und 12 im Außenbereich. Außerhalb des Futuro waren 7 Scans rundherum, 3 Scans von der Hebebühne (Abb. 2), um das Haus von oben aufzunehmen, und 2 Scans für die Aufnahmen des Bodenbereichs nötig. Im Inneren des Futuro wurden 4 Scans im Vorraum, 2 Scans im Bad und 3 Scans im Wohnbereich durchgeführt. Die Scans im Wohnbereich wurden mit dem Panorama-Scanner HDS3000 aufgenommen, für alle anderen benutzte man den Camera-View-Scanner HDS2500. Mit den Laserscannern erfolgte die Aufnahme von ca. 17,5 Millionen Punkten. Die insgesamt 7 Tachymeterstandpunkte

[1] Herzlichen Dank an LEICA Berlin für freundliche Unterstützung.

wurden im Außen- sowie im Innenbereich so gewählt, dass sie die Orientierung der Aufnahmeorte zueinander und die Erfassung aller Referenzmarken ermöglichten.

Abb. 2: Aufnahme von der Hebebühne

Aufgrund einiger weniger Abschattungsräume im Inneren des Futuro mussten Messungen mit einem Meterstab erledigt werden. Dazu gehörten beispielsweise Einmessungen einiger Küchenschränke, die trotz der drei Aufstellungen des Laserscanners im Wohnraum im Messschatten geblieben sind. Parallel zu den Laserscannermessungen wurden die digitalen Bilddaten über das Futuro mittels der Digitalkamera Nikon D1x gesammelt. Damit hat man sich die Option offen gelassen, evtl. Orthophotos von dem Objekt zu rechnen.

Die Messkampagne dauerte zwei Tage und nahm zwei Mitarbeiter in Anspruch. Zur Zeit der Aufnahmen herrschte überwiegend sonniges Wetter. Die Tachymeteraufnahmen erfolgten zum Teil im Dunkeln und bei den Aufnahmen von der Hebebühne herrschte zeitweise ein böiger Wind.

3 Bearbeitung und Auswertung der Daten

3.1 Arbeiten mit *Caplan*

Die Tachymeter-Messung wird von der Speicherkarte in Form eines *.GSI-Files ausgelesen und bearbeitet, dies geschieht mit dem Programm *Caplan*[2]. Es arbeitet mit den geodätischen Koordinaten. Dem *.GSI-File liegt jedoch ein mathematisches Koordinatensystem zugrunde. Auf die Benutzung der richtigen Koordinaten muss unbedingt geachtet werden.

Es wird ein lokales System angelegt, in dem die Tachymeterstandpunkte sowie die eingemessenen Zielmarken koordiniert werden. Die Koordinierung der Standpunkte sowie der Tie-Points, die von mehreren unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen wurden, erfolgt über eine Ausgleichung (Abb. 3), d. h. mögliche Fehler können aufgedeckt werden. Die Zielmarken, die von einem einzigen Standpunkt aufgenommen wurden, können nur polar angehängt werden und erfahren somit keine Kontrolle. Nach der erfolgreichen Koor-

[2] Cremers Auswertung und Planerstellung der Firma Cremer Programmentwicklung GmbH.

dinierung wird das bearbeitete Tachymetrie-File aus *Caplan* als *.txt-Datei ex- und in *Cyclone* importiert.

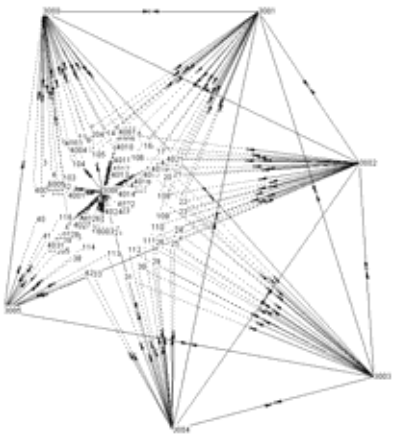


Abb. 3: Ausgeglichenes Raumnetz

3.2 Registrierung und Modellierung mit *Cyclone*

Nach dem Scannen steht dem Operateur eine unreferenzierte Punktwolke mit gerätebezogenen kartesischen Koordinaten zur Verfügung (Abb. 4). Die Koordinierung der gescannten Punkte erfolgt mittels der 3D-Laserscannerauswertesoftware *Cyclone* durch den Registrierungsvorgang. Die Registrierung unreferenzierter Punktwolken bedeutet die Orientierung der Scans zueinander und die Transformation der Punktwolken in ein Home-Koordinatensystem, im Futuro-Fall in das lokale Koordinatensystem des Tachymeterdatensatzes.

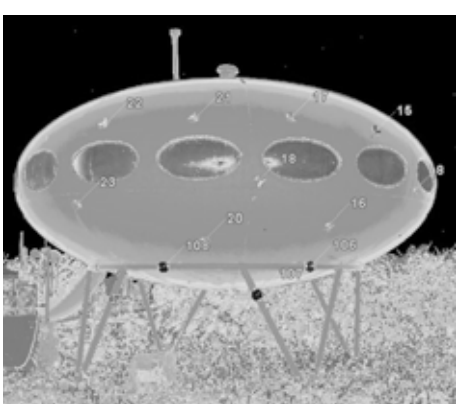


Abb. 4: Gescannte Punktwolke

Die Berechnung der Transformationsparameter erfolgt entweder mittels der 3D-Helmert-Transformation durch Zuordnung identischer Punkte – der Tie-Points – oder mittels des ICP-Algorithmus durch Zuordnung identischer Objektpunktbereiche, iterativ über eine Bündelblockausgleichung. Die Transformationsparameter sowie Fehler, die nach der Transformation entstehen würden, werden am Bildschirm ausgegeben und können analysiert werden. Zuordnungen, bei denen große Fehler auftreten, können von der Transformation ausgeschlossen werden. Bewegen sich die Fehler im Toleranzbereich (typische Werte liegen im mm-Bereich), so wird die Transformation durchgeführt.

Wegen der Nichteinhaltung des Mindestabstands beim Einscannen des Bades von Futuro konnten Bad-Punktwolken nicht registriert werden, das Bad wurde jedoch mit dem Meterstab eingemessen. Die übrige Registrierung der Futuro-Punktwolken bereitete keine Probleme, auch wenn einige identische Punkte wie z. B. ein paar Tie-Points in den von der Hebebühne gemachten Scans wegen dem zur Zeit der Aufnahmen herrschenden Wind als solche von der Berechnung der Transformationsparameter ausgeschlossen werden mussten.

Des Weiteren können mit *Cyclone* die gescannten Objekte modelliert werden. Die Modellierung lässt sich aufteilen in Auffinden der geometrischen Primitive basierend auf einer Dreiecksvermaschung gefolgt von der Ausgleichung und in das Verschneiden der gefundenen Primitive zu einem Gesamtobjekt. *Cyclone* ermöglicht eine problemlose Modellierung von Regelkörpern, wie Quadern, Kugeln, Zylindern und Ebenen. Da jedoch das Futuro aus vielen Freiformflächen besteht, war mit *Cyclone* die Modellierung nur weniger Objekte, wie z. B. die des Stahlgestells (Abb. 5), möglich.

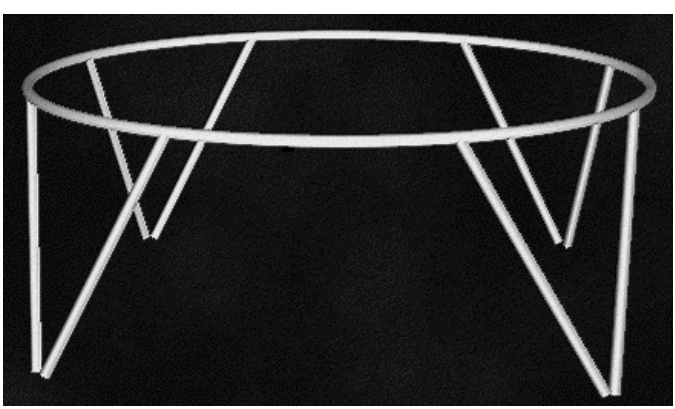


Abb. 5: Modelliertes Stahlgestell

Die übrige Modellierung erfolgte mit dem CAD-System *Allplan/Allplot FT*[3]. Die nötigen Parameter dazu wurden aus *Cyclone* herausgegriffen, Querprofile (Abb. 6) und Polylinien (Abb. 7) wurden exportiert.

[3] CAD-Software der Firma Nemetschek AG, München.

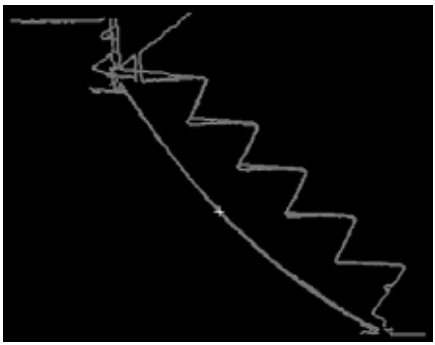


Abb. 6: Querprofil Treppe

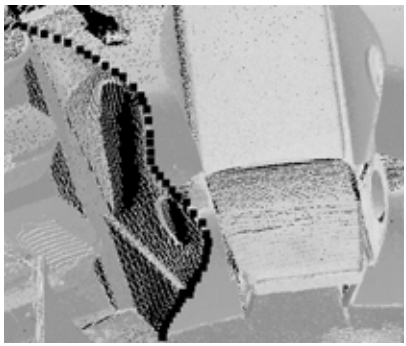


Abb. 7: Polylinie Stuhllehne

Um die Futuro-Schale zu modellieren, musste allerdings erst die ihr zugrunde liegende Form bestimmt werden. Dazu wurde in *Matlab*[4] ein Programm zur Klassifikation und Analyse der Flächen 2.Ordnung geschrieben. *Cyclone* erfüllte die Aufgabe der Elimination von Störpunkten aus den Punktwolken, welche die Futuro-Grundform beinhalten. Die störpunktfreie Punktwolke (Abb. 8) wurde für die weitere Bearbeitung mit verschiedener Punktdichte aus *Cyclone* exportiert.

Abb. 8: Störpunktfreie Futuro-Punktwolke

3.3 Parameterschätzung und Klassifizierung der Flächen 2. Ordnung mit *Matlab*

Als Flächen 2. Ordnung in allgemeiner Lage werden Punktmengen bezeichnet, deren kartesische Koordinaten einer Gleichung folgender Form genügen (BRONSTEIN 1991):

$$a_1X^2 + a_2Y^2 + a_3Z^2 + 2a_4XY + 2a_5XZ + 2a_6YZ + 2a_7X + 2a_8Y + 2a_9Z - a_0 = 0 \qquad (1)$$

[4] Software der Firma The MathWorks zur Lösung mathematischer Probleme.

Dabei sind X, Y und Z die dreidimensionalen Punktkoordinate, a_1 bis a_9 die unbekannten Flächenparameter und a_0 ein koordinatenunabhängiges Absolutglied. Flächen 2. Ordnung sind solche Flächen wie Ellipsoide, Zylinder, Kegel, Hyperboloide, Paraboloide usw.

In Matrizenschreibweise lässt sich die Gleichung (1) folgendermaßen ausdrücken (MERZIGER & WIRTH 1991):

$$\vec{x}^T A\vec{x} - 2\vec{a}^T\vec{x} - a_0 = 0 \qquad \text{mit } \vec{x} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix},\ A = \begin{pmatrix} a_1 & a_4 & a_5 \\ a_4 & a_2 & a_6 \\ a_5 & a_6 & a_3 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{a} = \begin{pmatrix} a_7 \\ a_8 \\ a_9 \end{pmatrix} \tag{2}$$

Jede allgemeine quadratische Form (2) lässt sich durch Translationen und eine Hauptachsentransformation auf eine rein quadratische Form – ihre Normalform – bringen:

$$\vec{u}^T A\vec{u} - a_0^{'} = 0 \qquad \text{mit } \vec{u} = \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix},\ A = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{pmatrix} \text{ und } a_0^{'} = \frac{\det(\widetilde{A})}{\det(A)} \tag{3}$$

wobei $\widetilde{A} = \begin{pmatrix} A & \vec{a} \\ \vec{a}^T & a_0 \end{pmatrix}$ ist. U, V und W sind die Punktkoordinaten nach der Translation und der Hauptachsentransformation.

Erläuterung der Vorgehensweise des entstandenen Programmpaketes zur Parametrisierung und Klassifizierung von Flächen 2. Ordnung (RATKE 2006)

Als erstes wird die störpunktfreie Punktwolke in Matlab eingelesen. Zur Bestimmung der Flächenparameter einer Fläche 2. Ordnung muss eine „bedingte Ausgleichung mit Unbekannten" durchgeführt werden (NIEMEIER 2002). Diese Ausgleichungsart kommt immer dann zum Einsatz, wenn nicht jede Beobachtung als eine eigene Funktion der Unbekannten dargestellt werden kann. Als Ergebnis der Ausgleichung erhält man die Flächenparameter a_1 bis a_9, die auf ihre Signifikanz geprüft werden. Nicht signifikante Parameter werden auf Null gesetzt. Die neuen Flächenparameter werden analysiert und es folgt automatisch die Einführung von Zusatzbedingungen. Zusatzbedingungen müssen für alle entarteten Flächen 2. Ordnung, und das sind alle Flächen 2. Ordnung außer Ellipsoide und Hyperboloide, da der Rang ihrer aus den Flächenparametern a_1 bis a_6 zusammengesetzten A-Matrix kleiner als 3 ist, definiert werden. Ebenfalls müssen Zusatzbedingungen für Rotationsflächen, auch wenn sie nicht entartet sind, eingeführt werden. Für einen Zylinder mit der Z-Achse als Symmetrieachse sehen Zusatzbedingungen folgendermaßen aus:

$$\hat{a}_3 = 0\,,\ \hat{a}_9 = 0 \tag{4}$$

Für einen Rotationszylinder mit der Z-Achse als Rotationsachse gelten folgende Zusatzbedingungen:

$$\hat{a}_1 - \hat{a}_2 = 0\,,\ \hat{a}_3 = 0\,,\ \hat{a}_4 = 0 \text{ und } \hat{a}_9 = 0 \tag{5}$$

Die Einführung dieser Bedingungen lässt sich wie folgt erklären. Die Normalform eines Zylinders lautet

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1 \text{, wobei a und b die Halbachsen in X- und Y-Richtung sind,} \qquad (6)$$

sie ist unabhängig von Z^2. Um den Term mit dem Z^2 aus der Gleichung (1) zu eliminieren, setzt man den Parameter a_3 auf Null. Mit $a_9 = 0$ werden spontane Verschiebungen des Zylinders entlang seiner Symmetrieachse ausgeschaltet. Liegt ein Rotationszylinder vor, so bedeutet die Gleichheit von a_1 und a_2, dass die Halbachsen des Zylinders in X- und Y-Richtung gleich sind. $a_4 = 0$ schließt eine willkürliche Rotation des Zylinders um die Z-Achse aus.

Gegenwärtig sind nur Zusatzbedingungen für den elliptischen und den Rotationszylinder sowie für ein Rotationsellipsoid erarbeitet worden. Werden also solche Zusatzbedingungen zwischen den Unbekannten eingeführt, so erfolgt eine erneute Ausgleichung, diesmal jedoch eine „bedingte Ausgleichung mit abhängigen Unbekannten“ (NIEMEIER 2002, RESTLE & STEPHANI 1988). Ist die Ausgleichung durchgeführt, so werden anhand der neu bestimmten Flächenparameter a_1 bis a_9 die Invarianten der Fläche berechnet. Die Invarianten einer Fläche 2. Ordnung sind z. B. die Ränge sowie die Determinanten der Matrix A und der erweiterten Matrix $\tilde{A}$. Mittels der Analyse der Invarianten wird die Punktwolke schließlich klassifiziert (RESTLE & STEPHANI 1988). Anschießend wird eine Hauptachsentransformation durchgeführt, um die Normalform der Fläche zu erhalten und sie so in ihrer Mittelpunkts- bzw. Scheitellage darzustellen. Die Bestimmung der Halbachsen der Fläche wird möglich. Das in *Matlab* entstandene Programmpaket arbeitet also mit den Methoden des *Reverse Engineerings*, d. h. aus einer Punktwolke wird die ihr zugrunde liegende analytische Fläche bestimmt.

Das Ergebnis der Untersuchung der störpunktfreien Futuro-Punktwolke ergab, dass sie ein Rotationsellipsoid (Abb. 9) mit den Halbachsen a = b = 3,925 m ± 1 mm und c = 1,891 m ± 1mm beschreibt. Die größten Koordinatenverbesserungen nach der Ausgleichung betragen in X-Richtung 1,8 cm, in Y-Richung 1,4 cm und in Z-Richtung 2,3 cm. Die Länge des größten Verbesserungsvektors beträgt 2,5 cm. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler a posteriori $\hat{\sigma}_0$ liegt bei 0,98 (vor der Ausgleichung $\overset{\circ}{\sigma}_0 = 1$). Die kartesischen Koordinaten der Punkwolke können in krummlienige ellipsoidische Koordinaten (Abb. 10) umgewandelt werden. Die Transformation erfolgt in iterativer Vorgehensweise (HECK 1995). Die ellipsoidische Höhe ist die Höhe über einem bestimmten Ellipsoid und erlaubt somit eine Analyse der Futuro-Oberfläche. Die Variation der Höhen lässt z. B. die Nahtstellen zwischen den 16 Futuro-Segmenten sehr gut erkennen. Die dunkle, gebogene Struktur, die im Bereich zwischen 0° und 20° Länge und –40° und +50° Breite zu sehen ist, deutet auf eine Deformation der Futuro-Schale hin. Weitere Verformungen lassen sich erahnen, um allerdings genaue Aussagen treffen zu können, müssen immer die Messgenauigkeiten des Laserscanners berücksichtigt werden.

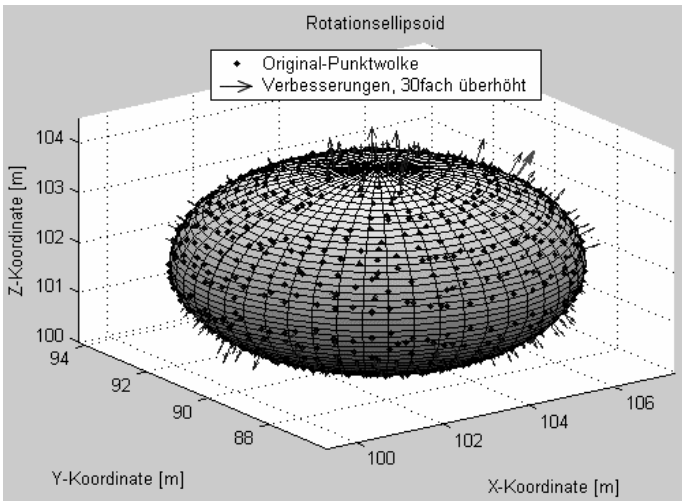


Abb. 9: Rotationsellipsoid mit Punktwolke und Verbesserungen

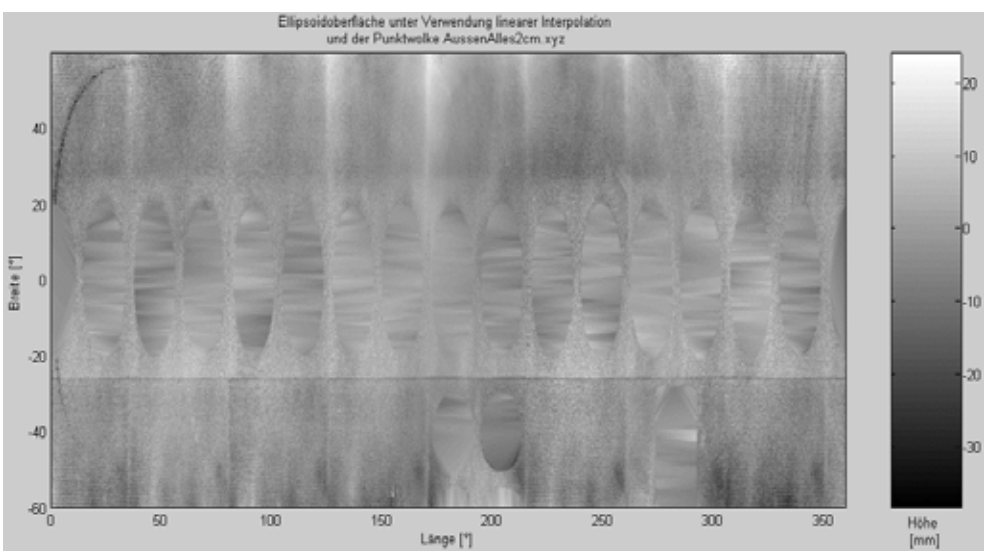


Abb. 10: Ellipsoidische Koordinaten der Futuro-Punktwolke

3.4 Modellierung mit *Allplan/Allplot FT*

Um die meisten Objekte von Futuro zu modellieren, wurde die CAD-Software *Allplan* benutzt. Hauptsächlich wurde das Modul „Modellieren 3D“ verwendet. Die Grundlage der Modellierung bilden die mit *Matlab* berechneten Halbachsen der Futuro-Schale, die aus *Cyclone* herausgegriffenen Objektparameter, wie z. B. Distanzmaße, sowie die ebenfalls aus *Cyclone* exportierten Querprofile und Schnitte. Die letzteren werden in *Allplan* mit

einfachen Elementen wie Geraden, Kreisbögen, Ellipsen usw. nachgebildet und dienen somit als Basis für Konstruktion von 2D-Flächen, welche die Umrisse der zu modellierenden Objekte darstellen. Aus den 2D-Flächen können Rotations- bzw. Translationskörper gebildet werden. Diese Körper werden als Grundkörper bezeichnet, da sie noch nicht die wahren Objekte wiedergeben. Für die Bearbeitung der Grundkörper steht dem Benutzer von *Allplan* eine Vielzahl an Werkzeugen zur Verfügung. Es ist oft nötig, mehrere Körper mit dem Grundkörper zu verschneiden, Schnittkörper zu erzeugen oder aber Schnittkörper aus dem Grundkörper herauszuschneiden, um das Modell des realen Objektes zu erstellen. Diese Arbeit erfordert ein ausgeprägtes räumliches Vorstellungsvermögen und Freude an der Detailperfektion.

Die Abbildungen 11 bis 13 zeigen die fertig modellierten Teilobjekte von Futuro.

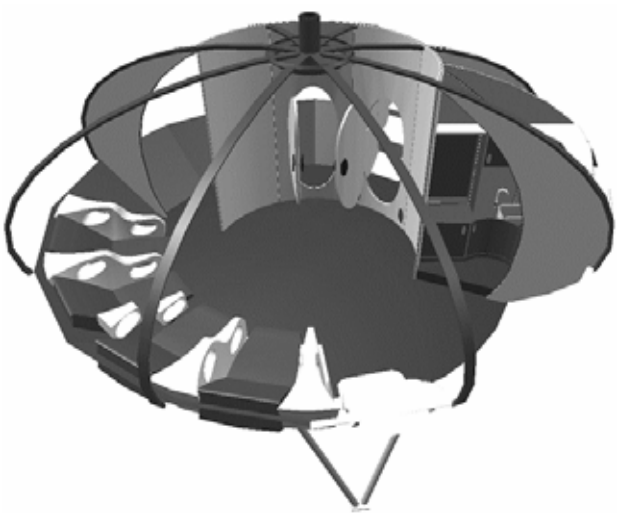


Abb. 11: Modellierter Innenraum von Futuro

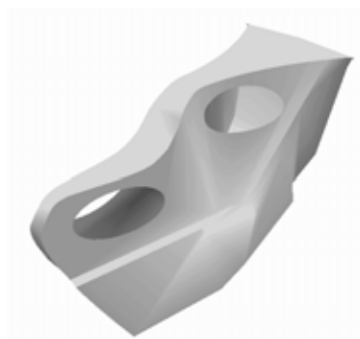


Abb. 12: Stuhllehne

Abb. 13: Außenansicht

Dem Rotationsellipsoid der Futuro-Schale (Abb. 12) liegt eine Ellipse mit den in *Matlab* berechneten Halbachsen zugrunde. Die Ellipse wurde in einen Rotationskörper umgewandelt und mit anderen Körpern verschnitten, z. B. um die Tür und die Fenster herauszuschneiden.

Des Weiteren lassen sich in Allplan 2D-Pläne der Modelle erstellen.

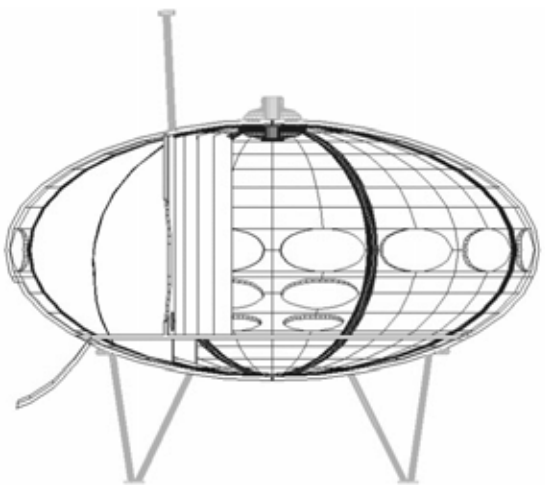


Abb. 14: Seitenansicht

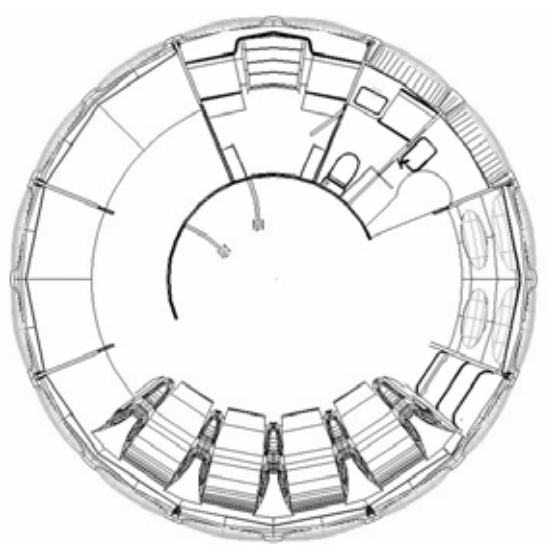


Abb. 15: Grundriss

4 Ausblick

Grafiken über ellipsoidische Koordinaten wie in Abbildung 10, die vom bestehenden *Matlab*-Programm für beliebige Ausschnitte einer Ellipsoidpunktwolke erzeugt werden können, sowie die Modelle aus *Allplan* können als Vorlage für präzise Schadenskartierungen genutzt werden. Die Archivierung so vieler Details ist förderlich für die Erhaltung des Futuro, an der sowohl private Personen als auch einige Museen interessiert sind. Das Futuro-Modell könnte dem Museumsbesucher in Zukunft eine genaue Vorstellung der futuristischen Wohnung geben, da alles von der Außenwand bis hin zur Inneneinrichtung bis ins kleinste Detail modelliert wurde. Es besteht eine Möglichkeit, in *Allplan* einen Kameraflug um und durch das Gebäude zu berechnen.

Das entstandene Futuro-Modell könnte auch mit einer Datenbank verbunden werden, welche die Ergebnisse der parallel zu den Vermessungsarbeiten durchgeführten Schadenskartierung enthält.

Eine weitere bis jetzt noch offen gelassene Möglichkeit ist, aus den mit der Digitalkamera Nikon D1x gesammelten digitalen Futuro-Daten Orthophotos zu berechnen.

Des Weiteren kann das *Matlab*-Programm zur Parametrisierung und Klassifikation der Flächen 2. Ordnung in allgemeiner Lage in Zukunft noch ausgebaut werden, sodass die Analyse aller Flächen 2. Ordnung möglich wird. Dann könnten beliebige Punktwolken eingelesen werden, deren Flächentyp vom Programm automatisch klassifiziert und deren Parameter bestimmt würden. Die Parameter könnten dann zur Modellierung in einem CAD-Programm, wie z. B. *Allplan*, verwendet werden.

Literatur

Bronstein, I. N. & K. A. Semendjajew (1991): *Taschenbuch der Mathematik.* Harri Deutsch Verlag, Frankfurt/Main. 231-236

Merziger, G. & T. Wirth (1991): *Repetitorium der Höheren Mathematik.* Feldmann Verlag, Hannover. 219-240

Heck, B. (1995): *Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 74-77

Home, M. & M. Taanila (2002): *Futuro: Tomorrow's House from Yesterday*. Desura Oy Ltd, Helsinki, Finnland

Niemeier, W. (2002): *Ausgleichungsrechnung.* Walter de Gruyter Verlag, Berlin. 152-176

Ratke, K. (2006): *Erfassung, Analyse und Modellierung des Futuro-Hauses von Matti Suuronen*, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München

Restle, M. & M. Stephani (1988): *Derivation of surfaces of second order degree from photogrammetric measurements for orthophoto production.* XI. Int. Symp. of CIPA: Contributions of modern photogrammetry, remote sensing and image processing methods to the architectural and urban heritage. Sofia, Oct. 4 -7. 194-205

Vom 3D-Scan zum Restaurierungsplan: Streifenlicht- und Laserscanner – eine sinnvolle Ergänzung

Jost-Michael BROSER

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt (in Form eines Zwischenberichts, denn die Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen) die Erfahrungen mit dem ersten Einsatz zweier 3D-Scannersysteme und einer zusätzlichen Auswertesoftware am Institut für Baugeschichte und Denkmalpflege an der Fakultät für Architektur der Fachhochschule Köln. Seit 1988 werden hier im Rahmen der Drittmittelforschung anwendungsbezogene Forschungsprojekte im Bereich der Denkmalpflege, Altbausanierung und Archäologie bearbeitet. Die freundliche Kooperation der Firmen Riegl, Phocad und Forte+Wegmann ermöglichte die Arbeit mit den Systemen:

- Laserscanner RIEGL LMS-Z420i, Software RISCAN PRO und PHIDIAS
- Streifenlichtscanner Breuckmann triTOS-HE, Software rapidformXO

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft an der Fakultät für Kulturwissenschaften der Fachhochschule Köln erfolgte die Dokumentation der Gebäude der Elly-Hölterhoff-Böcking-Stiftung in Bad Honnef durch 2D-Pläne und ein Raumbuch. Mit dem Laserscanner wurden die Hauptfassade und ein Innenraum mit Stuckdecke, mit dem Streifenlichtscanner Ausschnitte dieser Stuckdecke und einer Türlaibung erfasst. Hierbei zeigten sich die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der zwei Systeme. Mit dem Laserscanner lassen sich schnell große Flächen erfassen, mit einer Genauigkeit, die für die Weiterbearbeitung zu Planungszwecken, aber auch für weitere Dokumentationen im Bereich der Bauforschung mehr als ausreichend ist. Lediglich im Detailbereich stößt das System an seine Grenzen. Hier liegt die Stärke des Streifenlichtscanners. Der Scanausschnitt ist wesentlich kleiner, die Auflösung dafür ungleich höher, sodass auch die filigranen Elemente der Stuckdecke präzise erfasst werden konnten. Die Arbeit mit beiden Systemen setzt eine sorgfältige Standortwahl voraus, um die nicht erfassten Schattenzonen möglichst klein zu halten, die Anzahl der Standorte aber auch wegen der Datenmenge und aus Zeitgründen nicht zu groß werden zu lassen. Als bisher einzigen Nachteil stellen sich die hohen Investitionskosten dar, differenzierte Leasing- und Leihmöglichkeiten können das wirtschaftliche Risiko jedoch verringern.

1 Aufgabenstellung

Bei dem hier behandelten Objekt handelt es sich um die Gebäude der Elly-Hölterhoff-Böcking-Stiftung in Bad Honnef, 1906 gebaut als Heim für zwölf evangelische höhergestellte Damen mit angegliederter Haushaltsschule für Mädchen aus dem Volk, wie es damals hieß. Seit 30 Jahren werden die Gebäude von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft als Tagungszentrum mit Hotelbetrieb genutzt. Die Gebäude stehen unter Denkmalschutz, Eigner ist die Universität Bonn. Umfangreiche Voruntersuchungen waren

notwendig, da die Gebäude durch die großenteils noch vorhandene historische Ausstattung äußerst sensibel zu behandeln sind. Dies liegt auch im Interesse von Eigner und Betreiber, denn gerade das historische Ambiente wird von den Tagungsteilnehmern als ausgesprochen angenehm empfunden. Die Pläne aus der Erbauungszeit und auch teilweise von späteren Umbauten sind zwar vorhanden, es wurde jedoch schnell festgestellt, dass diese mit dem tatsächlichen Baubestand nur ansatzweise übereinstimmen, was nach unseren Erfahrungen bei älteren, aber auch viel jüngeren Gebäuden die Regel ist. Es erfolgte also eine vollständige Neuvermessung mit der Erfassung der Installationen durch das Institut für Baugeschichte und Denkmalpflege der Fachhochschule Köln und die Erstellung eines Raumbuches mit der Darstellung der Materialien unter bauhistorischen und konservatorischen Gesichtspunkten durch Studenten des Instituts für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft der Fachhochschule Köln. Auf dieser Grundlage soll ein Planungsvorschlag erarbeitet werden, durch den eine größtmögliche Modernisierung des Hotelbetriebs bei geringstmöglichem Eingriff in die historische Substanz erreicht werden soll.

2 Planerstellung

Als Grundlage für den Planungsvorschlag sollen zweidimensionale Pläne dienen, mit einer auf den Maßstab 1:50 abgestimmten Genauigkeit. Ein verformungs- oder gar steingetreues Aufmaß wurde nicht angestrebt. Hierzu erfolgte die Vermessung von außen mit dem elektronischen, reflektorlos messenden Tachymeter Nikon NPL-820 und der Software Tachy-CAD. Die Aufnahme der Innenräume erfolgte durch Handaufmaß, in einigen Bereichen auch mit dem Tachymeter. Gezeichnet wurde in Autocad 2004.

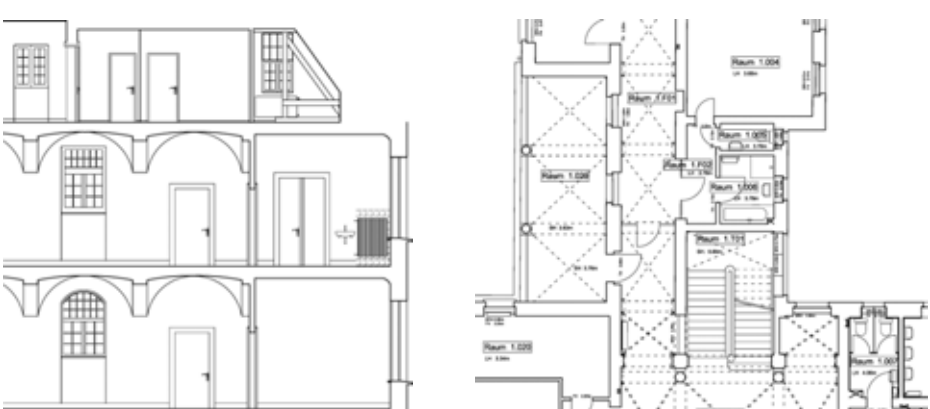
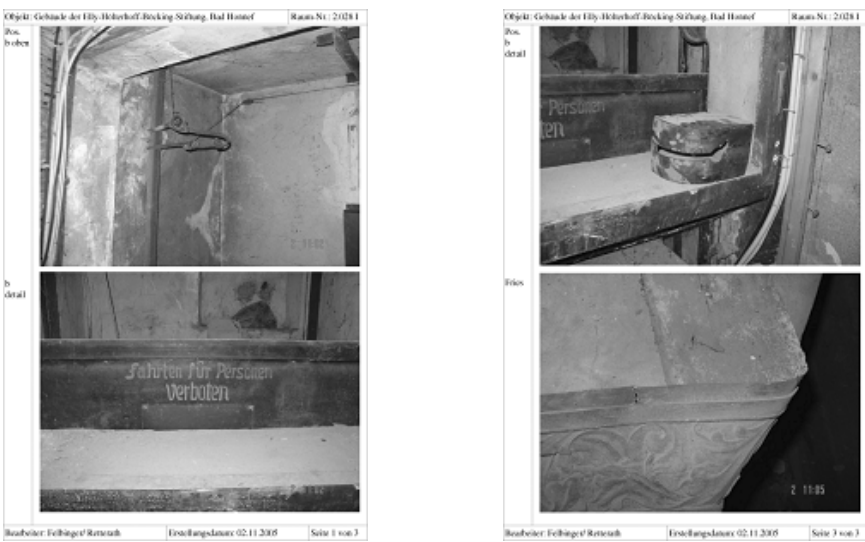


Abb. 1: Bestandserfassung in Grundriss und Schnitt

3 Raumbuch

Die detaillierte Erfassung des Innenausbaus erfolgte durch das Raumbuch. Das vorhandene Raumnummernsystem wurde sinnvollerweise übernommen und die Wände mit kleinen Buchstaben bezeichnet, wobei ein rechteckiger Raum aus den Wänden a bis d, Boden und Decke besteht. Die Wand mit dem Hauptzugang wird dabei mit a bezeichnet, die übrigen Wände schließen sich im Uhrzeigersinn an. Eine möglichst vollständige Fotodokumentation wird durch eine tabellarische Auflistung der einzelnen Ausbauteile mit genauer Positionierung und Bewertung unter restauratorischen Gesichtspunkten ergänzt.



Objekt: Gebäude der Elly-Hölterhoff-Böcking-Stiftung, Bad Honnef				Raum-Nr.: 2.028
				Raumfkt.: Maschinenr.
Pos.		Bestand	H	Anmerkungen
a		Feuerschutztür T 30, DIN rechts 138/106; 146/270 Rechts von Tür diverse Leitungen und Kabel aufputz Verputzt		
b		Türöffnung, Laibungen kassettiert, Kiefer Ab h 230 diverse Leitungen aufputz Verputzt Profilierte Sockelleiste/Holz		Ehemals DIN rechts, drei Fitschenbänder
c		Träger/Holz im Deckenanschluss. Verputzt		
d		Verputzt		
Fb		Zementestrichplatten		zeitgenössisch?
D		Verputzt. Holzgerahmte Öffnung		Wasserschäden
		Bewertung		
		bis 1909 in Verbindung mit 2.029 ein Raum, zeitgenössische Aufzuganlage d später eingezogen Nutzbar ohne Beeinträchtigung der Ausstattung(Aufzuganlage), möglichst auf d beschränken.		
Bearbeiter: Felbinger/ Retterath		Erstellungsdatum: 02.11.2005		Seite 2 von 4

Abb. 2: Bestandserfassung in einem Raumbuch

4 Ampelplan

Bestandspläne und Raumbuch sollen in einem so genannten Ampelplan miteinander verbunden werden. Dabei bedeuten die in den Plänen farbig eingetragenen Bereiche

- Rot: Eingriffe nicht möglich
- Gelb: Eingriffe nur mit großer konservatorischer Nachbearbeitung möglich
- Grün: Eingriffe nach äußerer Ansicht denkmalpflegerisch unbedenklich

Die farbige Darstellung darf den Planer aber nicht davon befreien sich das Raumbuch genau anzusehen. Um eine sinnvolle Nutzung des mehrere hundert Seiten umfassenden Werkes zu erreichen, ist eine direkte grafische Verknüpfung geplant. So sollen bei den Planungsarbeiten im CAD-Programm z. B. beim Anklicken der Raumnummer die entsprechenden Seiten des Raumbuchs auf dem Bildschirm erscheinen und somit die vollständigen Informationen zur Verfügung stehen.

5 3D-Scanner

Bei diesem Projekt ergab sich die Möglichkeit, zwei 3D-Scannersysteme auf ihre Tauglichkeit zur Erreichung der vorgegebenen Anforderungen zu testen. Mit dem terrestrischen Laserscanner RIEGL LMS Z-420i mit synchronisierter Digitalkamera wurden die Hauptfassade und ein Innenraum mit Stuckdecke, mit dem Streifenlichtscanner Breuckmann triTOS-HE Ausschnitte dieser Stuckdecke und einer Türlaibung erfasst.

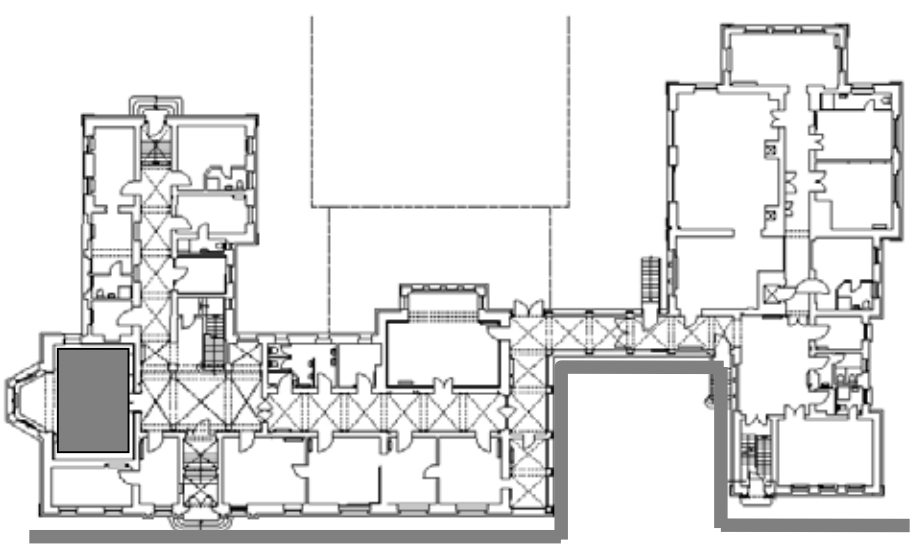


Abb. 3: Gescannte Flächen

5.1 Laserscanner

Mit dem Laserscanner wurden insgesamt sieben Panoramascans an der Hauptfassade durchgeführt. Da es sich hierbei um einen Test handelte und nur eine begrenzte Zeit zur Verfügung stand, wurden gewisse Verschattungen in Kauf genommen. Einige zusätzliche Scans und der Einsatz eines Hubsteigers hätten die Ansicht vervollständigt. Das Zusammenfügen der einzelnen Scans erfolgte durch mit dem Tachymeter eingemessene Passpunkte. Eine versuchsweise Montage ohne Passpunkte brachte aber ebenfalls hervorragende Ergebnisse.

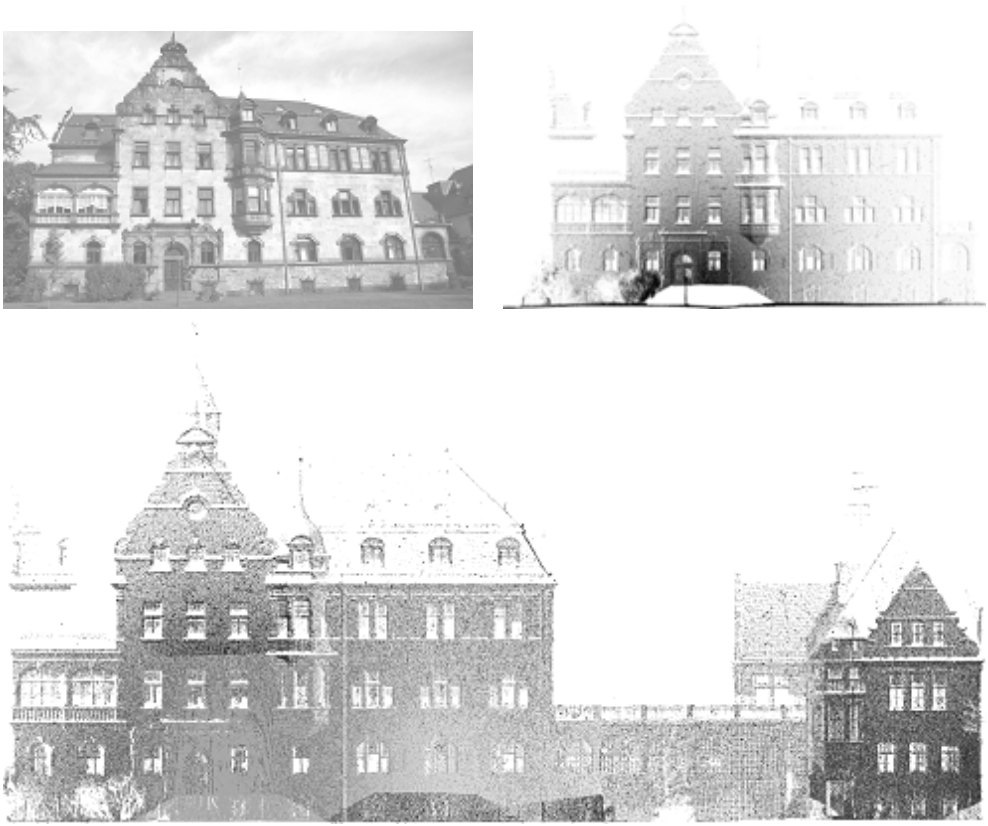


Abb. 4: Foto, erster Panoramascan und Punktwolke aller sieben Panoramascans (in unterschiedlichen Graustufen)

Zur weiteren Untersuchung wählten wir einen kleineren Bereich der Hauptfassade, und zwar das reich detaillierte Sandsteinportal. Beim Übereinanderlegen von Orthophoto und Punktwolke lässt sich sehr gut der Vorteil des Laserscanners erkennen. Zeigt das Orthophoto messbare Größen lediglich in der Entzerrungsebene, so stellt der Scanner das gesamte Objekt in wahrer Größe dar. Die Software PHIDIAS verbindet die Vorteile aus Punktwolke und Orthophoto und führt zu 3D-Zeichnungen, lediglich Freiformflächen wie die Statuen sollten gesondert betrachtet werden. Die Ergebnisse der Messung der Stuckdecke werden im Abschnitt über den Vergleich der beiden Systeme behandelt.

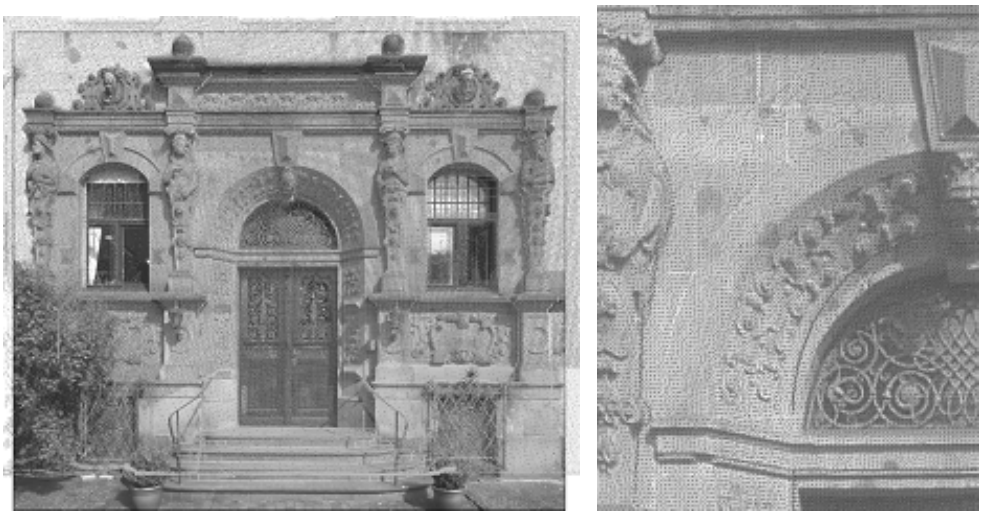


Abb. 5: Sandsteinportal: Orthophoto und Punktwolke, Gesamtansicht und Ausschnitt

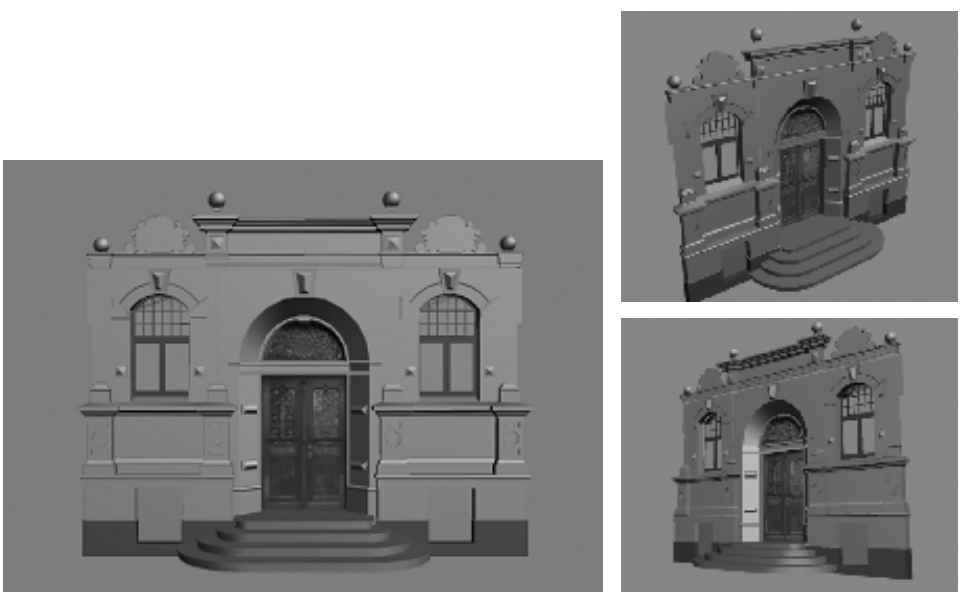


Abb. 6: Sandsteinportal: Auswertung mit PHIDIAS

5.2 Streifenlichtscanner

An der Stuckdecke des Innenraums sollten die Möglichkeiten des Streifenlichtscanners untersucht werden. Mit der uns zur Verfügung stehenden Gerätekonfiguration konnten nur relativ kleine Abschnitte in einem Scan erfasst werden. Zur Verminderung der Abschattung erfolgten insgesamt elf Scans an dem Deckenabschnitt, was mit diesem System sehr schnell

erfolgen kann, da ein Scan nur wenige Sekunden dauert. Das Zusammenfügen der einzelnen Scans erfolgte halbautomatisch durch Vergleich gemeinsamer Abschnitte. Mit der Auswertesoftware rapidformXO wurde vor der weiteren Betrachtung eine Dreiecksvermaschung durchgeführt, die dann im DXF-Format von der CAD-Software übernommen werden konnte.

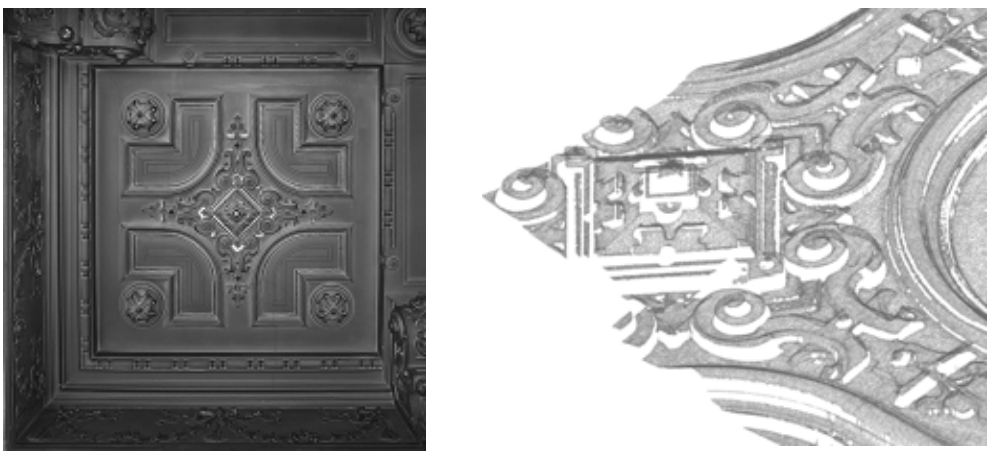


Abb. 7: Ausschnitt der Stuckdecke: Orthophoto und Isometrie der Dreiecksvermaschung

5.3 Vergleich der Systeme

An dieser Stuckdecke zeigten sich deutlich die Unterschiede zwischen den beiden Systemen. Der Laserscanner hat seine Stärken im eher weiten bis mittleren Entfernungsbereich (was die Architekturvermessung betrifft), der Bereich, welcher auch in der Denkmalpflege den überwiegenden Teil des Anwendungsspektrums abdeckt. Der Streifenlichtscanner zeigt seine Stärke im Detailbereich, insbesondere bei der Erfassung von Freiformflächen.

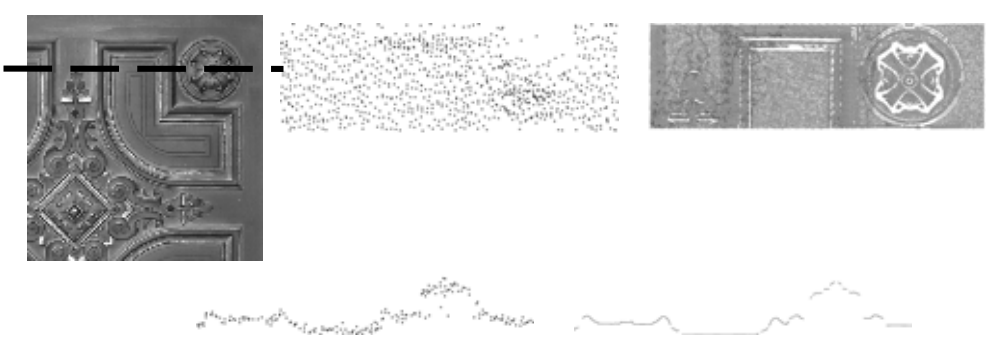


Abb. 8: Ausschnitt der Stuckdecke: Orthophoto mit Eintragung der Schnittlinie, Ansicht und Schnitt der Punktwolke des Laserscanners, Ansicht und Schnitt entwickelt aus der Aufnahme des Streifenlichtscanners

6 Fazit

Bei diesem ersten Test hinterließen die beiden Systeme einen ausgesprochen positiven Eindruck. Sie konkurrieren nicht miteinander, sondern bieten bei entsprechender Aufgabenstellung eine äußerst sinnvolle Ergänzung. Die Aufnahme mit dem terrestrischen Scanner ist für jede Form der Architekturvermessung empfehlenswert. Beeindruckt haben hier besonders die hohe Aufnahmegeschwindigkeit und die fast komplette dreidimensionale Erfassung, welche die fast beliebige Erstellung zweidimensionaler Pläne ermöglicht, die ja in der Praxis der Bauausführung weiterhin üblich sind. Kostspielige Nachmessungen können so stark reduziert werden. Insbesondere die Verbindung von Punktwolke und Digitalfoto lässt zu den schon vorhandenen Möglichkeiten noch weiteres Entwicklungspotenzial erhoffen, wie bei der Archäologie und der Erfassung von Kunstobjekten, wo es ja oft auf geringe Farbnuancen ankommt. Der Streifenlichtscanner kommt für alle eher kleinteiligen Objekte in Betracht. In der Industrie z. B. bei der Fertigungskontrolle schon länger im Gebrauch, sind ebenso Anwendungsmöglichkeiten in Denkmalpflege, Restaurierung, Archäologie und im gesamten musealen Bereich genügend vorhanden. Nachteilig wirken sich bei allen Scannersystemen die hohen Investitionskosten aus. Welches Museum kann sich schon eine solche Technik zusätzlich leisten, und das Personal zur Bedienung und Auswertung kommt noch hinzu. Hier sollte von allen Beteiligten noch intensiv nachgedacht werden.

Literatur

Auf Literaurangaben möchte ich hier bewusst verzichten. Zum einen ist über diesen relativ jungen Bereich des Vermessungswesens in den letzten Jahren dermaßen viel veröffentlicht worden, dass der zur Verfügung stehende Platz für eine Auflistung auch nur der wesentlichsten Literatur bei weitem nicht ausreicht, zum anderen ist mir keine Veröffentlichung bekannt, welche das Thema dieses Artikels ähnlich behandelt.

Bauwerksuntersuchungen durch terrestrisches Laserscanning mit dem Mensi GS100

Klaus MECHELKE, Harald STERNBERG und Thomas KERSTEN

Zusammenfassung

Das terrestrische Laserscanning System Mensi GS100 wurde in zwei Projekten zur Untersuchung von Bauwerken eingesetzt. Anhand der mit dem Laserscanner gewonnenen Daten konnten Bauwerksplanungen mit dem Ist-Bestand hinsichtlich Abweichungen und Kollisionen überprüft werden. Die Ergebnisse zeigen, dass aus Laserscanningdaten abgeleitete Werte sehr umfangreiche Prüfungen zulassen, dass jedoch bei erhöhten Genauigkeitsanforderungen (besser als 2 mm) das System an seine Grenzen stößt. Da umfangreiche CAD-Modellierungsarbeiten nicht erforderlich sind, können sehr schnell Ergebnisse (Faktor Erfassung/Auswertung 1:1) erzeugt werden.

1 Einleitung

Die Anwendungsgebiete für Laserscanner sind auf den ersten Blick vielfältig und in den meisten bisher durch Tachymetrie und Photogrammetrie beherrschten Anwendungen wird die Einsatzfähigkeit von Scannern seit einigen Jahren getestet. So berichteten JAHN et al. (2004) über die Objektmodellierung einer Industrieanlage und eines historischen Gebäudes aus Laserscannerdaten des CYRAX 2500 und HÖNNIGER & KERSTEN (2005) über den Einsatz des Mensi GS100 bei einer topographischen Geländeaufnahme. HESSE & STRAMM (2004) setzten den IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich für Deformationsuntersuchungen an einem Schleusentor ein und KERSTEN et al. (2006) verglichen den Mensi GS100 und den IMAGER 5003 bei Innenaufnahmen von zwei historischen Sälen im Hamburger Rathaus. Das Laserscanning System Mensi GS100 wird an der HafenCity Universität Hamburg seit September 2003 in einer Vielzahl unterschiedlichster Projekte (JAHN et al. 2004, HÖNNIGER & KERSTEN 2005, LINDSTAEDT & KERSTEN 2005, KERSTEN et al. 2005a, KERSTEN et al. 2006a, KERSTEN et al. 2006b) und Untersuchungen (KERSTEN et al. 2005a, 2005b, STERNBERG et al. 2005) eingesetzt, unter anderem auch zur Überprüfung von Bauwerken. Der Vorteil der Messmethode liegt hier in der vollständigen, flächenhaften Erfassung der Messobjekte, woraus sich vielfältige Auswertemöglichkeiten ergeben. In den hier vorgestellten Projekten Wasserturm Sternschanze Hamburg (s. Kap. 3) und U-Bahntunnel Gänsemarkt Hamburg (s. Kap. 4) werden aus den Laserscanningdaten Geometrien und diskrete Punkte mit dem Ziel abgeleitet, bestehende Bauwerksplanungen bzw. Konstruktionspläne zu überprüfen. Beide Projekte wurden in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro „Spanheimer Bornemann Ingenieure“ Hamburg bearbeitet.

2 Das terrestrische Laserscanning-System Mensi GS100

Für die Bauwerksuntersuchungen wurde das Trimble 3D-Laserscanning-System GS100 eingesetzt, das von Mensi S.A. in Frankreich hergestellt wird. Es besteht aus Messinstrument mit Zubehör und entsprechender Erfassungs- und Auswertesoftware. Die Streckenmessung erfolgt nach dem Impulslaufzeitverfahren mit einem grünen Laser mit 532 nm Wellenlänge. Die Genauigkeit der Einzelstrecke beträgt 6 mm. Die optimale Messentfernung des GS100 wird mit 2–100 m angegeben. Durch die bestmögliche Winkelauflösung von 0,0018° lässt sich in 100 m Entfernung eine Gitterweite von 3 × 3 mm realisieren. Der Panorama-View-Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann bis zu 5000 Punkte in der Sekunde messen, wobei ein Laserpunkt in 50 m Entfernung 3 mm groß abgebildet wird. Weitere technische Angaben und Abbildungen vom System sind in HÖNNIGER & KERSTEN (2005) aufgeführt. Die vollständigen technischen Daten sind unter MENSI (2004) zu finden.

3 Bestimmung von Geometrien im Wasserturm Sternschanze

Der ehemalige Wasserturm im Sternschanzenpark Hamburg (Abb. 1) wird zu einem Mövenpick Hotel umgebaut. Bei Erhaltung der Außenfassade erfolgt der Innenausbau mit Betonfertigelementen. Zum Zeitpunkt der Planung konnten Turminnendurchmesser und -achse aufgrund der Einbauten nur indirekt ermittelt werden. Nach der Entkernung des Turms konnte festgestellt werden, ob der Bestand mit der Planung übereinstimmt. Als geeignetes Messverfahren bietet sich hier Laserscanning an, da so die Innenfassade (Abb. 1 Mitte) mit geringem Aufwand erfasst werden kann. Weiterhin wurde ermittelt, inwieweit die zuvor indirekt abgeleitete Turmachse mit der aus den Laserscannerdaten ermittelten Achse übereinstimmt und ob beim Einbau der Geschoßfertigdecken Kollisionen auftreten. In diesem Projekt wird untersucht, ob terrestrisches Laserscanning die benötigten Maße mit der geforderten Genauigkeit liefern kann.

Die Innenfassade des Turms (Durchmesser 26 m, Höhe 50 m) wurde von fünf Scannerstationen nahezu vollständig erfasst. Auf zwei Stationen in der Grundebene wurde mithilfe eines Spezialstatives (Abb. 1 rechts) die Drehachse des Scanners horizontal gestellt, um so den Innenraum vom Boden bis zur letzten Ebene in 50 m Höhe erfassen zu können. Auf einer weiteren Station wurde mit einem 360°-Scan der untere Turmbereich erfasst. Zur Kontrolle wurde der obere Turmabschnitt zusätzlich von zwei Stationen in einer Höhe von ca. 47 m aufgenommen. Die einzelnen Stationen wurden mithilfe von elf Passpunkten (acht Kugeln und drei Targets), die auf drei Ebenen im Turminnenraum verteilt waren, verknüpft. Diese Punkte wurden vorab tachymetrisch mit einem Leica TCRP1201 im Baustellenkoordinatensystem bestimmt. Nach Geo-Referenzierung der Punktwolken in dieses Koordinatensystem lagen die Restfehler an den Passpunkten bei 4 mm.

Abb. 1: Wasserturm Sternschanze Hamburg: Außenansicht (links), Innenansicht (Mitte), Scanner GS100 im Spezialstativ auf der Turmgrundebene (rechts)

Die Auswertung der Punktwolken erfolgte mit den Programmen RealWorks Survey 4.2 und 3Dipsos 3.0 der Firma Mensi SA. Im ersten Bearbeitungsabschnitt wurde im Programm 3Dipsos die Turmachse aus Planungsdaten konstruiert. Nach Bereinigung der Punktwolke des Turminnenraums wurde mit einer Best-Fit-Methode ein Zylinder so in den Turm eingepasst, dass keine Kollisionen auftraten. Die lotrechte Hauptachse des Zylinders wurde dann mit der Planungsachse verglichen. Die Differenz zwischen beiden Achsen lag bei 25 mm.

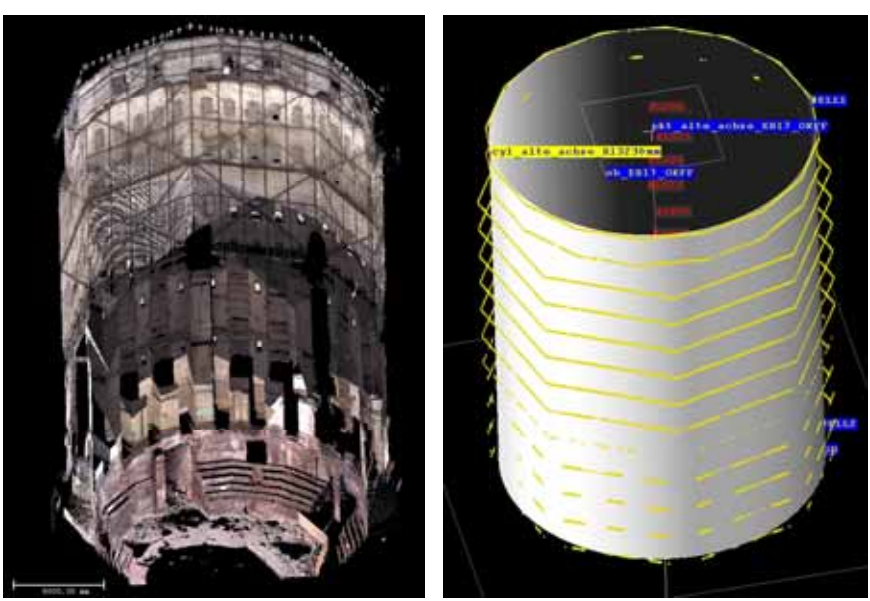


Abb. 2: Gesamte Punktwolke Wasserturm (links) und Teilpunktwolke (Geschossebenen, in gelben Linien) des Wasserturms mit eingepasster Sollgeometrie (grauer Zylinder) (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

Im nächsten Bearbeitungsschritt wurden mit AutoCAD anhand der Planungsunterlagen die Turmachse sowie die Sollgeometrie in Form eines Zylinders auf dieser Achse erzeugt. Der Radius des Zylinders wurde der Planung entnommen. Dieser Körper wurde in das Programm RealWorks Survey importiert und in der Punktwolke gelagert. Mithilfe des Surface Inspection Tools der Software wurde die Punktwolke nun auf Kollisionen mit der Sollgeometrie untersucht, wobei nur Punkte in Höhe der jeweiligen Geschossdecken berücksichtigt wurden. Im oberen Turmbereich konnten Kollisionen von bis zu 60 mm an Teilflächen festgestellt werden. Kollisionsflächen konnten in einer Abwicklung des Zylinders farbkodiert sowie in einem Diagramm dargestellt werden. Die Diagrammdarstellung in Abbildung 3 zeigt die abgewickelte Sollgeometrie als rote Linie (Null-Linie) und die als radiale Strecken gerechneten Differenzen zwischen Sollgeometrie und Punktwolke als grüne Linie. An den Stellen, an denen die grüne die rote Linie unterschreitet, treten Kollisionen auf. Nachteilig an der Darstellung ist, dass die Nullstelle der Abwicklung vom Programm festgelegt wird. Kritische Stellen lassen sich so nur schwer auf das Objekt übertragen.

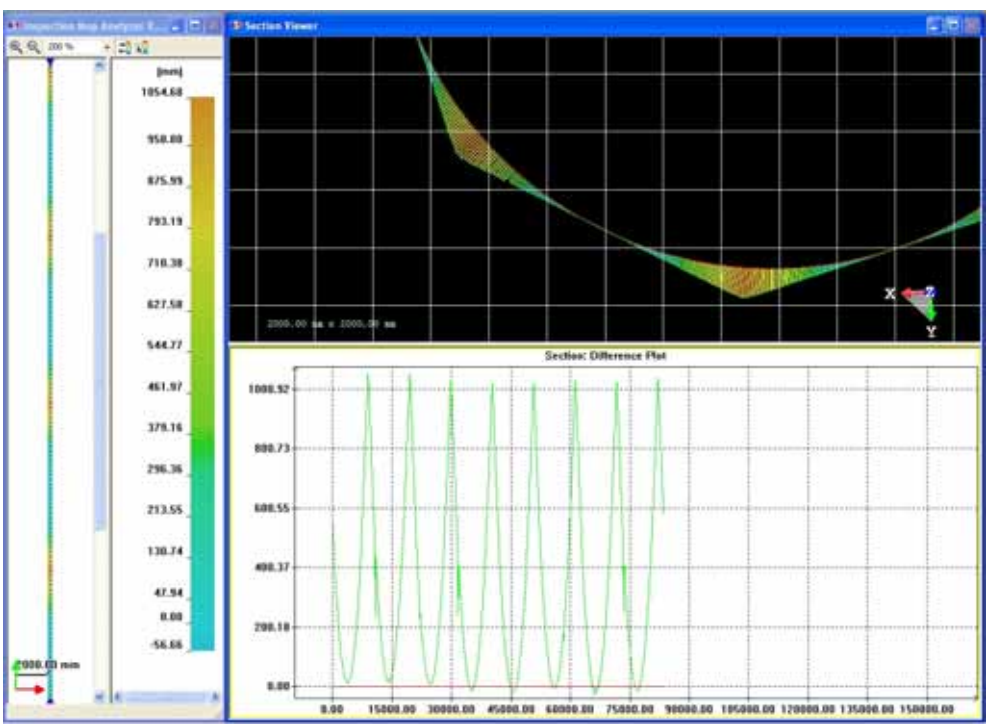


Abb. 3: Kollisionsdetektion mit dem Surface Inspection Tool in RealWorks Survey

In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurden in Höhe der jeweiligen Geschossebenen 05 bis 17 horizontale Scheiben in Geschossdeckenstärke aus der Punktwolke ausgeschnitten und in Polylinien umgewandelt. Die Erzeugung der Polylinien erfolgt automatisch, wobei jedoch teilweise noch eine Nachbearbeitung erforderlich war. Die Polylinien wurden dem Bauträger im DXF-Format zur Überprüfung der Planung der Geschossfertigdecken übergeben.

Nach Rohbaufertigstellung der Geschossebenen 00 bis 08 wurde eine tachymetrische Kontrollmessung mit dem Leica TCRP1201 in den Ebenen 07 und 08 durchgeführt. Die Streckenmessung erfolgte reflektorlos. Ermittelt wurde hierbei der Innendurchmesser des Turms zwischen Punkten, die auch in der Punktwolke identifizierbar waren. Ein Vergleich der tachymetrisch ermittelten Strecken mit den entsprechenden aus der Punktwolke abgeleiteten Strecken zeigte im Mittel Differenzen von 2 mm (Standardabweichung 4 mm).

Die Datenerfassung am Wasserturm betrug insgesamt acht Stunden, wobei das Laserscanning sechs und die geodätische Passpunktbestimmung zwei Stunden dauerte. Die Auswertung (Referenzierung, Achsbestimmung, Kollisionsprüfung, Polylinienerzeugung) konnte dagegen in sieben Stunden durchgeführt werden.

4 Positionsbestimmung von Bauteilen im U-Bahntunnel Gänsemarkt Hamburg

Eine Flanschverbindung in einem U-Bahntunnel der Hamburger Hochbahn musste wegen Undichtigkeiten und dadurch eindringendem Grundwasser neu abgedichtet werden. Zur passgenauen Vorfertigung von Flanschblechen war die Positionsbestimmung des Stirnflächenzentrums von 240 Flanschbolzen mit einer Genauigkeit von besser als 3 mm gefordert.

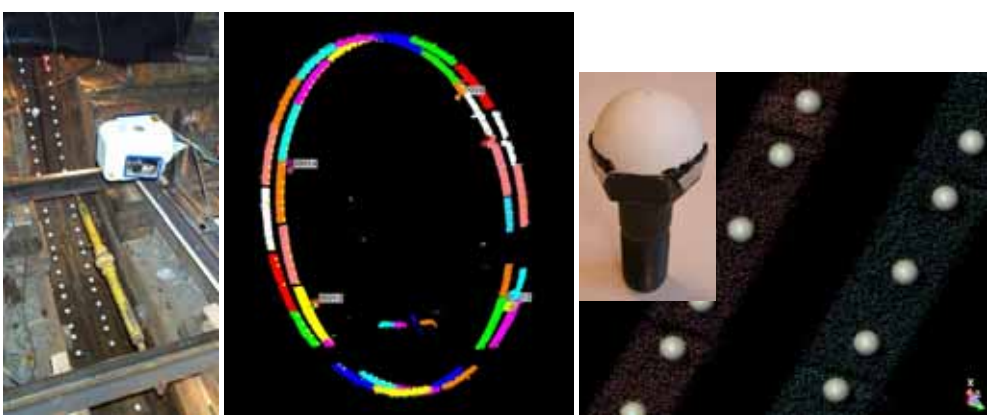


Abb. 4: V. l. n. r.: Laserscanner im Tunnel, farbkodierte Punktwolken, Halbkugel-Adapter und automatisch eingepasste Kugeln (Spheres)

Es wurde untersucht, ob der terrestrische Laserscanner Mensi GS100 die geforderte Genauigkeit liefern kann. Dazu war es notwendig, das Messrauschen durch eine genügende Anzahl von Mehrfachmessungen und eine optimale Reflektivität der Objektoberfläche zu minimieren. Außerdem stand in der nächtlichen Betriebspause von 1 bis 4 Uhr eine Messzeit von drei Stunden zur Verfügung. Um diese vorgegebenen Kriterien einhalten zu können, wurden die Bolzen mit speziell angefertigten Halbkugeln (halbierte Tischtennisbälle auf Magnetadapter, s. Abb. 4) signalisiert, die eine halb-automatische Koordinatenberechnung des Kugelzentrums bereits in der Scanningsoftware PointScape durch die Sphere-Extraction-Funktion ermöglichten. Das Halbkugelzentrum stellt das Zentrum der Stirnfläche des Bolzens und damit den gesuchten Punkt dar. Um den gesamten Flansch in einer Aufstellung erfassen zu können, wurde der Scanner in der an der HCU entwickelten Spezi-

alhalterung (s. Abb. 1 und Abb. 4 links) mit horizontaler Drehachse aufgestellt. Die signalisierten Bolzen wurden jedoch wegen der begrenzten Anzahl der Signale abschnittsweise gescannt. Über vier Referenzpunke wurde die Punktwolke in das Tunnelkoordinatensystem transformiert. Zur Genauigkeitskontrolle wurden 40 Bolzenpositionen mit einem Sokkia-Tachymeter aufgenommen.

Für die Auswertung benötigte man alle drei Mensi-Programme des Laserscanning-Systems. Im ersten Schritt wurde in PointScape die halb-automatische Sphere-Extraction-Funktion verwendet, in dem in der unbereinigten, nicht selektierten Punktwolke ein Punkt der Kugel angeklickt wurde. In die Punktwolke wurde dann an dieser Stelle eine Kugel mit vorgegebenem Radius eingepasst und der Kugelmittelpunkt berechnet. Im zweiten Schritt wurden die Kugelmittelpunkte mit RealWorks Survey in das Tunnelkoordinatensystem transformiert, sodass georeferenzierte Koordinaten der Bolzenköpfe vorlagen. Diese Koordinaten konnten mit den tachymetrisch bestimmten Referenzpunkten verglichen werden. Aus den Abweichungen konnte eine Standardabweichung der 3D-Position von 2 mm berechnet werden, wobei Ausreißer allerdings bis zu 8 mm groß waren. In die Berechung dieser Standardabweichung geht aber die Messunsicherheit des Tachymeters mit ein. Im dritten Schritt wurde mit 3Dipsos versucht, die Abweichungen der Bolzenköpfe von einem Idealkreis zu bestimmen. Der Kreis wurde nach der Methode der kleinsten Quadrate bestmöglich in die gesamte ausgewählte Punktwolke eingepasst. Da die Punktwolke nur aus den Mittelpunkten der Halbkugeln bestand, musste die Punktwolke nicht weiter selektiert werden. Dabei wurde der Radius nicht vorgegeben, sondern wurde zusätzlich bestimmt. Als Berechnungsfunktion wurde der Kreis (im Raum) gewählt. Als Ergebnisse des „Fittings“ wurden der Radius, der Flanschmittelpunkt und der Abstand der einzelnen Bolzen vom Idealkreis aus der Funktion „Distance to Entity“ ermittelt. Zur Überprüfung wurden die berechneten Koordinaten in AutoCAD geladen und dort der Abstand der Bolzenköpfe vom Mittelpunkte und der Abstand zweier benachbarter Bolzenköpfe dargestellt (Abb. 5).

Des Weiteren wurde untersucht, inwieweit alle Bolzenpunkte von einer in 3Dipsos eingepassten Ebene abweichen. Für die Beurteilung der Einpassung können die Eigenschaften des neuen, eingepassten Objektes (z. B. Standardabweichung und Normalenvektor der Ebene) angezeigt werden. Durch Vorgabe eines Schwellwertes für die Standardabweichung kann der „Fitting“-Algorithmus eine verbesserte Einpassung durchführen. Neben diesen numerischen Qualitätsangaben bietet die Software die Möglichkeit einer visuellen Interpretation der Ergebnisse, was insbesondere bei der Überprüfung von Werkstücken oder anderen Objekten gut genutzt werden kann. Über die Funktion „Distance to Entity“ werden die Abstände der einzelnen Punkte zum Objekt farblich dargestellt und in einem Verteilungsdiagramm erläutert (Abb. 5). Dies gibt auch die maximalen Abstände in beiden Richtungen wieder. Diese Art der Visualisierung vereinfacht nicht nur die Interpretation, sondern es können so auch Ausreißer im Verteilungsdiagramm leicht eliminiert werden, da die Schwellwerte manuell einstellbar sind. Abbildung 5 zeigt das Diagramm zusammen mit den farblich kodierten Abweichungen von einer Ebene. Die Ausgabe dieser Darstellung kann nur über einen Screenshot erfolgen, da die Abspeicherung der farblich kodierten Punktwolke nicht vorgesehen ist. Außerdem lässt sich die Punktgröße in dieser Darstellung nicht variieren, sodass einzelne Punkte kaum erkennbar sind. Die Bearbeitung und Einpassung von Punktwolken mit der Modellierungssoftware 3Dipsos ist in KERSTEN et al. (2005c) beschrieben. Zur besseren Visualisierung wurde diese Auswertung in Matlab ein zweites Mal durchgeführt, um die Verformungen dort farblich ausgeben zu können (Abb. 5 rechts).

Die gesamte Auswertezeit (Einpassung der Kugeln in die Punktwolke und Berechnungen) betrug etwa 8 h und damit ergibt sich ein Verhältnis von Mess- zur Auswertezeit von 1:3.

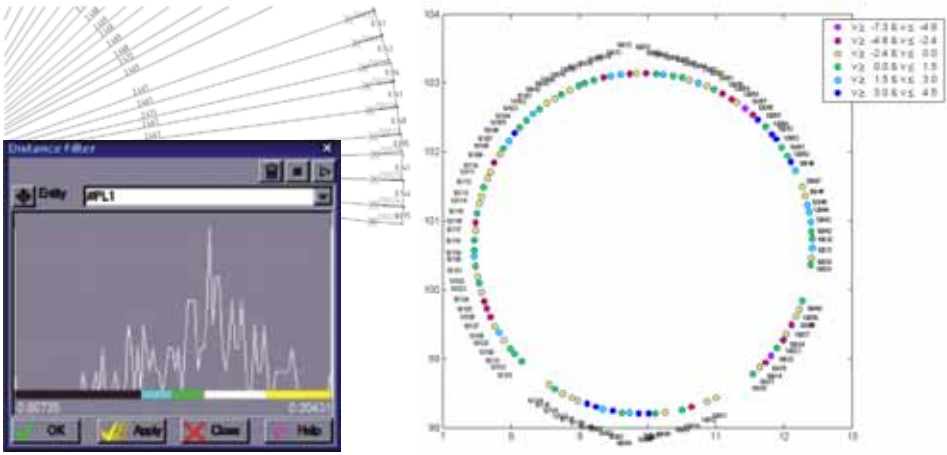


Abb. 5: Darstellung Radius und Abstand in AutoCAD, Abweichung der Punkte von der Ebene dargestellt in 3Dipsos und farblich kodiert in Matlab (in mm) (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

5 Fazit und Ausblick

Das terrestrische Laserscanning zeigte sich in beiden Projekten als eine geeignete Methode zur Erfassung komplexer und (un-)regelmäßiger Objekte wie beim Wasserturminnenraum und bei der Flanschverbindung im U-Bahntunnel. Durch die flächenhafte Erfassung der Messobjekte boten sich vielseitige Möglichkeiten für die Auswertung in den verwendeten Auswertetools wie z. B. RealWorks Survey 4.2 und 3Dipsos. Hierbei war es erforderlich, nur einfache Geometrien (Koordinaten, Polylinien) aus der Punktwolke für die Achsbestimmung, zur Kollisionsprüfung und zur Koordinatenbestimmung abzuleiten. Dadurch konnte jeweils eine effiziente Projektbearbeitung mit einem Faktor 1:1 bzw. 1:3 für die Datenerfassung/Auswertung erfolgen. Die Punktbestimmung erfolgte in beiden Projekten mit einer Genauigkeit von bis zu 3 mm, was beim Projekt U-Bahntunnel nicht ganz den Anforderungen entsprach. Es zeigte sich, dass bei solchen höheren Genauigkeitsanforderungen ein besonderes Augenmerk auf die Verteilung der Passpunkte um das Objekt zu legen ist. Nachteilig wirkte sich die niedrige Scangeschwindigkeit gerade bei hoher Auflösung aus, da dadurch eine längere Scanzeit in Anspruch genommen werden musste. Hier ist also noch Optimierungspotenzial vorhanden.

Durch den Einsatz von so genannter „third party software“ (wie z. B. Matlab) bei der Datenbearbeitung erhöht sich die Flexibilität der Anwender für eine effiziente Projektbearbeitung, da die Auswertetools des Laserscanning-Systems nicht alle gewünschten Bearbeitungen bzw. Ausgaben ermöglichen.

Es kann empfohlen werden, terrestrische Laserscanning-Systeme in Zukunft für Bauwerksuntersuchungen einzusetzen, da die Akzeptanz der gelieferten Ergebnisse beim Kunden sehr hoch ist und weitere spätere Auswertungen auf Kundenwunsch jederzeit möglich sind.

Literatur

Hesse, C. & H. Stramm (2004): *Deformation Measurements with Laser Scanners – Possibilities and Challenges.* Int. Symposium on Modern Technologies, Education, and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, November 4-5, Sofia, Bulgaria

Hönniger, C. & T. Kersten (2005): *Topographische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 224-231

Jahn, I., Kersten, T. & R. Kinzel (2004): *Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 222-229

Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K. & C. Acevedo Pardo (2005a): *Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 98-107

Kersten, T., Sternberg, H. & K. Mechelke (2005b): *Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System Mensi GS100.* Optical 3-D Measurement Techniques VII, Gruen & Kahmen (Eds.), Vienna, Vol. I. 122-131

Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K. & M. Lindstaedt (2005c): *Zur Objektgenerierung in Punktwolken des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 mit der Modellierungssoftware 3Dipsos.* Terrestrisches Laserscanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe, Band 48. 127-146

Kersten, T., Biebermann, M. & M. Schneider (2006a): *3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 254-263

Kersten, T., Sternberg, H. & E. Stiemer (2006b): *Terrestrisches 3D-Laserscanning im Hamburger Rathaus – Mensi GS100 und IMAGER 5003 im Vergleich*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Lindstaedt, M. & T. Kersten (2005): *Ein virtueller Klon für Helgolands Lange Anna durch terrestrisches Laserscanning.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 216-223

Mensi (2004): *GS 100 3D laser scanner*. www.mensi.com/website2002/gs100.asp

Sternberg, H., Kersten, T. & N. Conseil (2005): *Untersuchungen des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. 56-65

Dokumentation und Visualisierung einer Tempelanlage auf Basis von Laserscanning und Photogrammetrie

Nicole OBERTREIBER und Volker STEIN

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Diplomarbeit am Fachbereich Vermessungswesen und Geoinformatik der Fachhochschule Bochum in Kooperation mit den Universitäten Köln und Tübingen ist der terrestrische Laserscanner Imager 5003 der Firma Zoller + Fröhlich zur Erfassung einer Tempelanlage eingesetzt worden. Die beiden Technologien, Photogrammetrie und Laserscanning, sind zur großflächigen geometrischen Dokumentation und Visualisierung dieser Tempelruine genutzt worden. In diesem Beitrag wird der Projektablauf von der Datenerfassung bis zur Visualisierung am Beispiel des Sanktuars (Allerheiligstes, Aufbewahrungsort der Götterbarke) dargestellt. Zudem wurden Trümmerstücke, die sich auf dem Tempelgelände befanden, auf Basis von 3D-Triangulationen als repräsentatives 3D-Modell erstellt.

1 Einleitung

Laserscanning zeichnet sich durch einen hohen Automatisierungsgrad aus. Ist ein Messvorgang einmal gestartet, können extrem viele Punkte in sehr kurzer Zeit aufgenommen werden. Einzug in die kommerzielle Anwendung hat der Laserscanner daher vor allem in den Bereichen der Photogrammetrie gefunden, wo nun statt Fotos große 3D-Punktwolken erfasst werden. Bei der geometrischen Rekonstruktion des Objektes durch Laserscanning besteht keinerlei Abhängigkeit zur Beleuchtung, allerdings fehlen Farbinformation der Objektoberfläche. Jedoch ist gerade diese Information für die Grabungswissenschaftler von Interesse, da sie einen dokumentarischen Wert besitzt. Die Kombination von Laserscanning (Geometrie) und Photogrammetrie (Texturinformationen) bildet eine Grundlage zur Objektvisualisierung.

2 Das Aufnahmeobjekt

Bei dem aufgenommenen Objekt, das dieser Arbeit zugrunde liegt, handelt es sich um eine Tempelruine der Löwengöttin Repit. Abgesehen von diesem etwa 75 × 45 m großen Bauwerk liegen auf dem Konzessionsgelände noch ein, allerdings bis auf einen vorgesetzten Torbau verschütteter Tempel Ptolemaios IX, ein Prozessionsweg, eine Felsnekropole mit zahlreichen undekorierten, aber auch dekorierten Gräbern, ein Asklepiosheiligtum und die antike Stadtruine aus griechisch-römischer Zeit (Abb. 1). Alle häufig noch farbigen Darstellungen und Inschriften sind durch Salzbefall, Witterungseinflüsse und teilweise unsachgemäße Restaurierung stark gefährdet. Die erfassten Daten bilden u. a. das Grundlagenmaterial für die Epigrafiker, Konservierungswissenschaftler und Bauforscher, um ein nachhaltiges konservatorisches Konzept zu entwickeln (LEITZ & EL-SAYED 2005).

Abb. 1: Übersichtsbild des Arthibis Tempels

3 Datenerfassung und Auswertung

Die durchgeführten Arbeiten konzentrierten sich ausschließlich auf das „gut erhaltene" Sanktuar. Aufgenommen wurde dieser Bereich mit 37 Scans (Auflösungsstufe „High"), insgesamt ergab das mehr als 1,8 Mrd. Punkte, daraus folgt eine Datenmenge von ca. 9,3 GByte für die „Rohscans". Um die einzelnen Laserscannerstandpunkte miteinander verknüpfen zu können, wurden 214 Targets in dem Messgebiet angebracht. Zur Georeferenzierung in das Tempel-Grundlagennetz wurden 33 dieser Targets tachymetrisch bestimmt. Die Transformationsparameter der Georeferenzierung setzten sich aus jeweils 6 Unbekannten bei Festlegung des Maßstabs (= 1) pro Aufnahme zusammen. Es handelt sich also jeweils um eine räumliche Ähnlichkeitstransformation (allerdings ohne Maßstabsfaktor). Über 3 identische Punkte könnten diese 6 Parameter bestimmt werden. Jedoch sieht die Praxis eine höhere Überbestimmung vor. In der Regel sollten zumindest 4 identische Punkte pro Aufnahme vorhanden sein.

In der Version Z+F LaserControl 6.6.1 und höher ist das Ausgleichungsprogramm NEPTAN als PlugIn integriert. Das Programm NEPTAN berechnet simultan die ausgeglichenen Transformationsparameter der lokalen Systeme (Position und Orientierung der 37 Scanner-Standpunkte) und standardisierte Kenngrößen der statistischen Netzanalyse. Eingangswerte sind die lokalen Koordinaten aus der Targetmessung und die globalen Koordinaten der Targets aus der Tachymetermessung. Aus diesen Beobachtungen werden die ausgeglichenen Parameter für die Transformation in das globale System jedes einzelnen lokalen Systems bestimmt. Das Ergebnis der räumlichen Blockausgleichung ist in Abbildung 2 dargestellt (BAHNDORF & SCHREYER 2005).

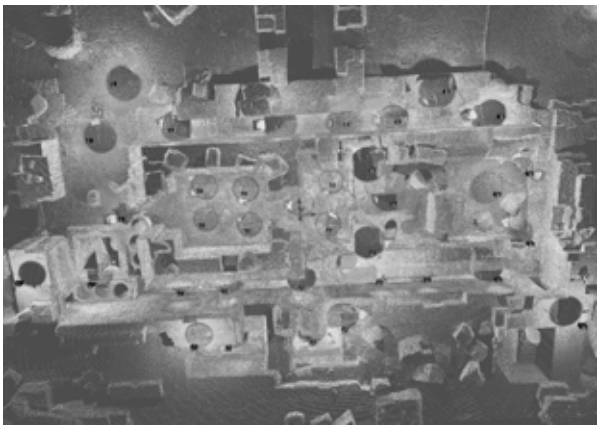


Abb. 2: Darstellung der 37 Scans im 3D-View (Z+F LaserControl)

4 Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie

Zusätzlich zu den Koordinaten registriert der Laserscanner auch den Grad der Reflektion des Streckenmesssignals am Objekt und stellt somit für jeden Messpunkt die sog. Intensität zur Verfügung. Die Visualisierung der vierten Messgröße erfolgt durch eine Grauwert-Codierung (Abb. 3 links), stark reflektierende Punkte erscheinen hell, stark absorbierende Punkte werden dunkel abgebildet. Diese Information ermöglicht eine Interpretation des Messobjektes. In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass das Messobjekt ohne Intensitätswerte (rechts) in Bezug auf die Objektoberfläche und ihre Geometrie nicht zu deuten ist.

Abb. 3: Darstellung mit Intensitätswerte (links), ohne Intensitätswerte (rechts)

Aus der Punktwolke lassen sich noch weitere Informationen herleiten, indem die Daten in Abhängigkeit der Entfernung oder der Höhe dargestellt werden (Abb. 4). Die Entfernungsbilder geben die geometrischen Verhältnisse der Umgebungsobjekte wieder, wohingegen die Intensitätsbilder zur Identifikation und Extraktion von Objekten, der visuellen Inspektion, aber auch zur Klassifizierung der Objektoberfläche und zur Dokumentation verwendet werden.

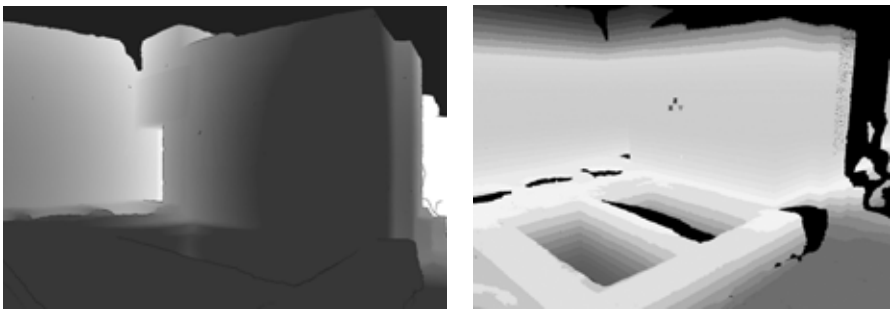


Abb. 4: Entfernungsabhängige (links), höhenabhängige (rechts) Darstellung

Eine ideale Grundlage zur Objektvisualisierung bildet die Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie. Eine Überlagerung der Punktwolke mit Bildinformationen führt zu einer deutlich besseren Interpretationsmöglichkeit (Abb. 5). Objekte können anhand ihrer visuellen Darstellung besser erkannt und analysiert werden als aufgrund rein geometrischer Merkmale. Zudem besitzen die Farbinformationen einen dokumentarischen Wert, der für diverse Anwendungen von Interesse ist (KERN 2003). Eine Verknüpfung dieser Messmethoden lässt sich leicht dadurch realisieren, dass ein Laserscanner zusätzlich mit einer Digitalkamera ausgerüstet wird, die simultan zum Scannvorgang Bildinformationen über das Messobjekt sammelt. Bei dem verwendetem System Z+F IMAGER 5003 war zum Aufnahmezeitpunkt allerdings noch keine Digitalkamera integriert. Die Software Z+F LaserControl bietet ein Tool zur nachträglichen Punktwolkencolorierung an. Die vor Ort erstellten Bilder waren ursprünglich nur als Auswertehilfe gedacht, konnten aber zur Colorierung benutzt werden.

Abb. 5: Kombination Laserscanning und Photogrammetrie

5 Modellierung und Visualisierung

Dreidimensionale Visualisierungen steigern das Verständnis über die räumlichen Bezüge innerhalb der dargestellten Objekte. Texturierte Animationen ermöglichen eine realitätsnahe virtuelle Begehung der erfassten Räume und wecken das Interesse. Die Kombination aus Laserscanning und photogrammetrischem Bildmaterial bietet sich für diese Zwecke an. Neben den verschiedenen Visualisierungen, die sich allein aus der Information der Punktwolke herleiten lassen, gibt es auch die Möglichkeit, aus der Punktwolke heraus Geometrien zu extrahieren. Um gemessene Objekte darstellen zu können, gibt es eine Vielzahl an geometrischen Beschreibungen, die Teilbereiche des Objekts bestmöglich approximieren (z. B. Ebenen, Kugeln, Zylinder, ...). Durch mathematisch exakte Formen lassen sich diese über die vier Attribute Lage, Form, Orientierung und Größe naturgetreu nachbilden.

In der Auswertesoftware Cyclone 5.2 der Firma Leica Geosystems wird das Objekt so weitestgehend durch Regelgeometrien beschrieben. Die modellierten Geometrien bilden das Grundgerüst für die Weiterverarbeitung in einem CAD-System. Dafür muss vorab in Cyclone aus den extrahierten Objekten ein *COE*-File erzeugt werden, der über eine MDL-Applikation im CAD-System MicroStation geladen werden kann. Die geladenen Geometrien werden als Polygonflächen-Modell dargestellt. MicroStation bietet unfassendes Konstruktionswerkzeug an, mit dem die Polygonflächen entweder verändert, da z. B. die Eckpunkte sich nicht in einem Punkt schneiden, oder nachkonstruiert werden, wenn sie nicht über die richtige Ausrichtung verfügen. Um einen photorealistischen Eindruck zu erhalten, werden den Polygonflächen photogrammetrisches Bildmaterial zugewiesen. In diesem Fall muss eine Polygonfläche unten links beginnen und entgegen dem Uhrzeigersinn verlaufen. Als Ergebnis wird ein texturiertes 3D-Modell des Sanktuars präsentiert, während angrenzende Bereiche mit in MicroStation vordefinierten Farben dargestellt werden können. Für die Grabungswissenschaftler sind Detailerkennbarkeit, Farberkennung und Maßstabstreue von Bedeutung.

6 3D-Triangulation – Behandlung von Trümmerstücken

Abb. 6: Beschädigtes Säulenkapitell auf dem Grabungsgelände

Viele Objekte lassen sich nicht durch Regelgeometrien beschreiben. Auf der Basis von Dreiecksvermaschungen können derartige Körper räumlich beschrieben werden. Ein gutes Beispiel dafür stellt das hier dargestellte beschädigte Säulenkapitell dar (Abb. 6). Das Objekt ist mit fünf Scans erfasst und über zehn Targets miteinander verknüpft worden. Das Datenvolumen beträgt etwa 5,2 Mio. Punkte, bei einer Dateigröße von etwa 180 MByte. Die Bearbeitung der Punktwolke erfolgt mit der Software RapidForm PP2 2004 der Firma INUS Technologie. RapidForm ist speziell für die Auswertung und Modellgenerierung kleinere Volumenelemente ohne nen-

nenswerte Regelgeometrien ausgelegt. Für den Import dieser Punktwolke werden einige Dateiformate angeboten, u. a. auch das ASCII-Format **.pts*, das auch von der Scansoftware der Firma Zoller + Fröhlich unterstützt wird. Das PTS-Format enthält die 3D-Koordinaten sowie die Intensitätswerte, die von RapidForm nicht übernommen werden. Die folgende 3D-Triangulation ist abhängig von der lokalen Punktdistanz und dem Winkel zwischen den Normalenvektoren der entstehenden Dreiecke. Kann die Punktwolke nicht ausreichend trianguliert werden, ist es von Vorteil, diese vorher genügend auszudünnen. Durch geeignete Filtertechnik kann eine gleichmäßige Punktverteilung erzeugt werden, die eine Dreiecksvermaschung ermöglicht. Nach der Vermaschung bleiben häufig viele Löcher zurück, die teilweise auf Abschattungen zurückzuführen sind (Abb. 7).

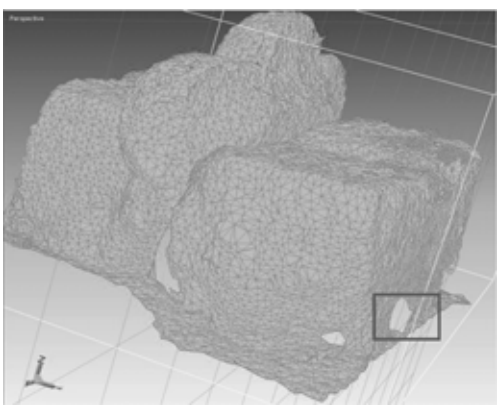


Abb. 7: Lokalisierung und Füllen von Löchern (Holefilling)

Die Bearbeitung dieser Hohlräume teilt sich in zwei Schritte auf: zum einen in die Lokalisierung der Löcher, zum anderen in das Füllen (HoleFilling-Algorithmus). Löcher werden definiert über die Anzahl ihrer Grenzkanten (Kanten, die nur einem Dreieck angehören). Es wird unterschieden zwischen internen und externen Grenzkanten. Interne Grenzkanten beschreiben die Umrisse von Löchern, externe Grenzkanten definieren einen begrenzten Modellbereich. Aufgrund einer zu großen Anzahl an Grenzkanten oder einer zu komplexen Grenzstruktur werden einige Löcher gar nicht gefüllt und müssen manuell nachbearbeitet werden. Für die Füllung der Löcher stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, u. a. die Option „Curvature“, bei der die angrenzende Topologie der Oberfläche berücksichtigt wird (Krümmungsbasierte Interpolation).

Nach einer Dreiecksvermaschung kann das Modell viele Unregelmäßigkeiten enthalten. Das sind Bereiche, in denen die Punkte eine zu kleine Anzahl an direkten Nachbarn aufweisen. Bei diesem iterativ optimierenden Prozess wird die Oberfläche mit Rücksicht auf die Topologie geglättet (Smooth-Algorithmus). Eine weit verbreitete Methode ist der Laplace-Algorithmus, der in der Software implementiert ist. Betrachtet werden die Knoten, in denen die Dreiecke zusammenlaufen. Es wird versucht, jeden Knoten räumlich in den Mittelpunkt seiner direkten Nachbarn zu schieben, um möglichst gleichseitige Dreiecke zu schaffen. Um das Modell in einer besseren Auflösung zu charakterisieren, werden neue Dreiecke in die Vermaschung interpoliert (Subdivision). Dabei wird in jede Dreiecksseite ein Punkt eingefügt (Knoten-Einfüge-Algorithmus), wodurch ein feinmaschigeres Netz entsteht. Die

genaue Position der Punkte ist abhängig vom jeweiligen Algorithmus bzw. der Kantenlänge. Nach der Interpolation wird über ein lokales Glätten die Topologie der Oberfläche berücksichtigt. Die Position der Punkte verändert sich leicht. Für eine höhere Auflösung wird die berechnete Dreiecksvermaschung mit dem Originaldatenbestand verglichen, wobei die Abweichungen innerhalb eines bestimmten Toleranzbereichs betrachtet werden (Fit Shell To Point Cloud). Die Dreiecksvermaschung wird an die Originaldaten angeglichen. Es fließen neue Punkte aus den Original-Daten ein und Punkte aus der Vermaschung entfallen (Abb. 8).

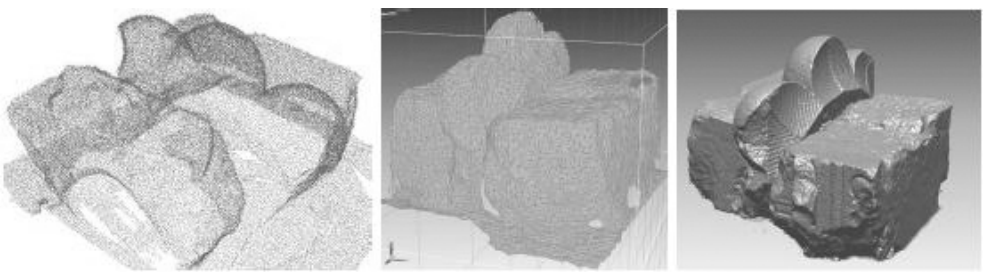


Abb. 8: Ausgangsdaten (links), Vermaschung mit Löchern (Mitte) und Endprodukt ohne Texturierung (rechts)

Der hohe Informationsgehalt in Form eines dichten Dreiecksnetzes (2.100.000 Dreiecke) führt zu einer langen Rechenzeit, z. B. beim Rendern, und Erschwernissen in der Visualisierung. Die Weiterverarbeitung ist oft arbeits- und zeitintensiv. Die Vereinfachung der Information mittels Reduktion der Daten wird als Simplifikation bezeichnet. So kann die Anzahl an Dreiecken, bevorzugt an Stellen mit topologisch uninteressanter Struktur, reduziert werden (1.000.000 Dreiecke). Die Erhaltung an Oberflächenstruktur muss abgeschätzt werden (BURKARD 2003).

Mit der Überlagerung von Bildtexturen kann ein photorealistischer Eindruck erzeugt werden. TextureMapping bezeichnet eine Methode, um die Oberflächenstruktur als Bild auf die modellierte Geometrie zu projizieren. Voraussetzung dafür sind korrespondierende Punkte im Bild und der Modelloberfläche (Abb. 9). Die Qualität der Texturierung hängt von Form und Struktur der Objektoberfläche ab.

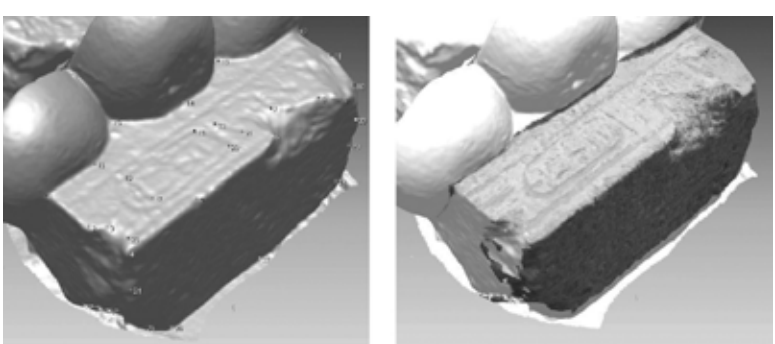


Abb. 9: Gerendertes Modell mit korrespondierenden Punkten (links) und texturiertes Modell (rechts)

7 Fazit

Messweite und Auflösung (Detailerkennbarkeit) des benutzten Systems eigneten sich gut für die Erfassung der Anlagenbereiche und entsprachen den gewünschten Anforderungen der Bauforscher, um Hieroglyphen und Steinstrukturen zu erkennen. Eine colorierte hochauflösende Punktwolke hat für bestimmte Ansprüche einen Visualisierungscharakter. Es muss nicht aufwändig modelliert werden und trotzdem kann das Objekt photorealistisch präsentiert werden. Die Punktwolke ist kein Restprodukt mehr. Für effektiveres Arbeiten wäre ein Scannersystem mit integrierter Kamera von Vorteil gewesen. Eine nachträgliche Colorierung ist zwar möglich, aber sehr zeitaufwändig.

Auf der Basis von Dreiecksvermaschung konnte ein repräsentatives 3D-Modell erstellt werden, allerdings ist die Einarbeitung in die Software arbeitsintensiv. Das liegt zu einen an dem Umfang des Softwarepakets als auch an Problemen in der Stabilität von RapidForm. Eine Optimierung einzelner Algorithmen bezüglich Dauer und Auslastung ist unter Berücksichtigung der Rechnerleistung anzustreben. Um eine manuelle Nachbearbeitung möglichst gering zu halten, ist es von Vorteil, einige Prozeduren zu automatisieren.

Literatur

Bahndorf, J. & U. Schreyer (2005): *Verknüpfung von LaserScans.* techscan GmbH, Beitrag zum 65. DVW-Seminar in Fulda, Terrestrisches Laserscanning (TLS) Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft; Schriftreihe Band 48/2005; Wißner-Verlag, Augsburg

Burkard, F. (2003): *Scannen eines großen Objekts mit Schwerpunkt auf die Nachbearbeitungsschritte Holefilling, Smoothing und Simplification.* Bachelorarbeit, Universität Konstanz

Kern, F. (2003): *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Geodätische Schriftenreihe der Universität Braunschweig, Heft Nr. 19

Leitz, C. & R. El-Sayed (2005): *Athribis, der Tempel der Löwengöttin.* Universität Tübingen, Portrait einer Grabung in Oberägypten: pagina GmbH, Tübingen

Herstellerforum

3D-Nahbereichscanning für die Denkmalpflege

Stephanie ADOLF und Michael BARNES

Zusammenfassung

Das Ersetzen von gefährdeten Steinskulpturen im Außenbereich ist durch die immer aggressiveren Umwelteinflüsse in den letzten Jahren ein dringliches Thema für die Denkmalschutzbehörden geworden. Dabei ist die gelungene Umsetzung von Kopien besonders unter dem wachsenden Kostendruck als problematisch für den Denkmalschutz anzusehen. Der folgende Beitrag beschreibt eine Prozesskette, die moderne Techniken wie das 3D-Scannen und das CNC-Fräsen sinnvoll mit der händischen Tätigkeit des Bildhauers verknüpft. Auf diese Weise können technische und menschliche Ressourcen zum gegenseitigen Vorteil genutzt werden, um wirtschaftlich hochwertige Kopien von Skulpturen zu erstellen. Die gewonnenen Messdaten bieten außerdem einen zusätzlichen Nutzen für Marketingzwecke für Städte und Gemeinden durch die Herstellung von Miniaturen oder Animationen.

1 Projekt

Die im Außenbereich aufgestellte Sandsteinfigur „Faun“ (rechts im Bild) wird sowohl direkt als auch indirekt bewittert. Im Laufe der Zeit wurden an der Figur Schäden festgestellt, welche den Ersatz der Skulptur durch eine Kopie in der öffentlich zugänglichen Jugendstilbrunnenanlage in Bad Nauheim erforderlich machte. Die Kopie der ca. 1,80 × 0,6 × 0,4 m großen Figur sollte in Originalgröße und Originalmaterial (Sandstein) erfolgen.

Abb. 1: Figur „Faun“ (rechts), Jugendstilbrunnenanlage, Bad Nauheim

2 3D-Scanning im Nahbereich

Optische Messverfahren zur Topometrieerfassung insbesondere von Freiformflächen wurden ursprünglich für industrielle Anwendungen entwickelt. Mittlerweile finden die 3D-Messverfahren jedoch auch zunehmend erfolgreiche Anwendungen im Kunst- und Kulturbereich sowie im medizinischen Sektor, da sie vollkommen berührungslos und zerstörungsfrei arbeiten. Zur Geometrieerfassung der Skulptur wurde daher ein auf Weißlichtprojektion beruhendes Verfahren mit strukturierter Beleuchtung eingesetzt (triTOS-System der Firma Breuckmann GmbH). Dieses aktive Messverfahren beruht auf dem Triangulationsprinzip. Dabei wird eine Projektion hochgenauer, periodischer Gitter auf dem Messobjekt von einer hochauflösenden Kamera unter einem bestimmten Winkel (Triangulation, meist 30°) aufgenommen. Die Messzeit beträgt ca. 1 Sekunde pro Aufnahme.

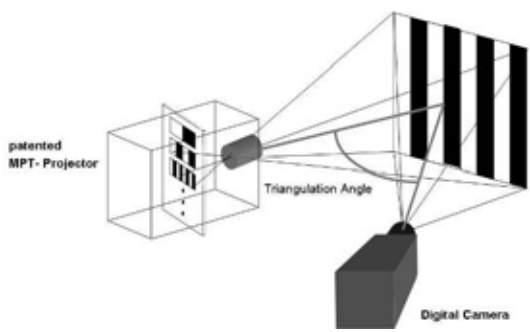


Abb. 2: Funktionsprinzip Weißlichtstreifenscanning (Triangulation)

Die Umwandlung der verzerrten Projektionsgitter in dreidimensionale Messdaten (Punktewolke/Dreiecksmaschen) erfolgt durch die Analyse der verschiedenen Bildsequenzen mit einer Kombination aus Gray-Code und Phasen-Shift-Technik.

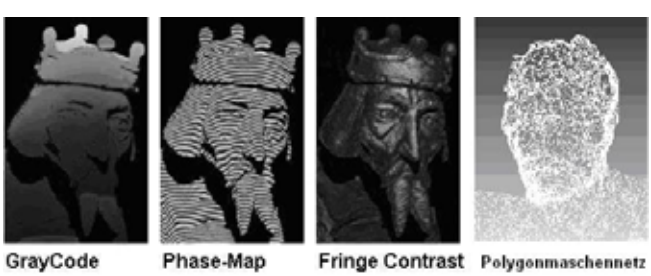


Abb. 3: Umwandlung der Projektionsgitter in dreidimensionale Messdaten

Zur kompletten Objektvermessung erfolgen Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen. Die Einzelaufnahmen können anschließend in der Software über Geometriemerkmale registriert und gemergt werden. Neben dem Alignment der Einzelscans anhand der Objektgeometrie kann das Matchen auch mit Passmarken oder einer Kombination mit Photogrammetrie, Realtime-Tracking-Systemen oder Roboter erfolgen.

Abb. 4: Registrierung der Einzelaufnahmen über Konturmatching

3 Projektdurchführung

3.1 Objektvermessung „Faun“

Zur kompletten Erfassung der ca. 1,80 × 0,6 × 0,4 m großen Figur wurden ca. 120 Einzelaufnahmen von verschiedenen Standpunkten aufgenommen. Verwendet wurde ein triTOS-HE System der Firma Breuckmann GmbH mit Messfelddiagonalen von 100 mm und 400 mm. Pro Messung können maximal ca. 1,3 Mio. Punkte erfasst werden, wenn das Messfeld voll ausgefüllt ist. Der Anwender hat sowohl vor als auch nach der Messung die Möglichkeit, die Auflösung entsprechend auf die Anwendung abzustimmen. Das triTOS-HE System weist einen Triangulationswinkel von 20° im Gegensatz zu den standardisierten 30°-Systemen auf, wodurch Hinterschnitte einfacher zugänglich sind. Zudem besitzt das System die Möglichkeit der Farbtexturaufnahme zusätzlich zur Geometrie.

No. of Vertices : 749377
No. of Faces : 1498768
Width of B.Box : 592.61655 mm
Height of B.Box : 1801.81053 mm
Depth of B.Box : 457.29384 mm
Center of B.Box : 102.32534, 112.99975, 9.20071
Center of Mass : 93.25287, 104.52618, -49.54700
Area of Shell : 2916631.37280 mm2
Volume of Shell : 1587431.48.54408 mm3

Abb. 5: 3D-Scanning in situ, geshadetes STL-Modell mit 750.000 Punkten (reduziert)

3.2 Messdatennachbearbeitung „Faun“

Die Einzelmessungen wurden mittels Konturmatching in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Aufgrund der umfangreichen Datenmenge wurde zum Registrieren und Mergen der Daten die RapidForm XO Software eingesetzt. Diese Software ist zur Verarbeitung großer Datenmengen konzipiert. Sie verfügt zudem über sehr gute Algorithmen zum krümmungsabhängigen Löcher schließen und zum Reduzieren großer Datenmengen. Auf diese Weise wurde ein wasserdichter STL-Datensatz mit ca. 750.000 Punkten / 1,5 Mio. Dreiecke und einer Größe von 73 MB erstellt.

Bei Systemen für das Nahbereichscanning erfolgt die Messdatenausgabe üblicherweise sofort im STL-Format (vernetzte Punktewolke). Da Aufnahmerichtung und Punkteabstand bekannt sind, kann die Punktwolke sofort optimal trianguliert werden. Das STL-Format hat den Vorteil, dass es umgehend von nachfolgenden Prozessketten übernommen werden kann. So können die Daten direkt an Programme zur Fräsbahnberechnung und CNC-Fertigung oder an Rapid-Prototyping-Anlagen übergeben werden. Softwareprogramme wie RapidForm ermöglichen zudem die schnelle Ableitung von CAD-Daten über Flächen oder Schnitte (IGES) oder einen Soll-Ist-Vergleich.

3.3 Fertigung Kopie „Faun“

Der Datensatz des „Faun“ wurde an eine entsprechende Software zur Fräsbahnberechnung übergeben. Vom Steinmetz wurde ein geeigneter Sandstein-Rohblock ausgewählt.

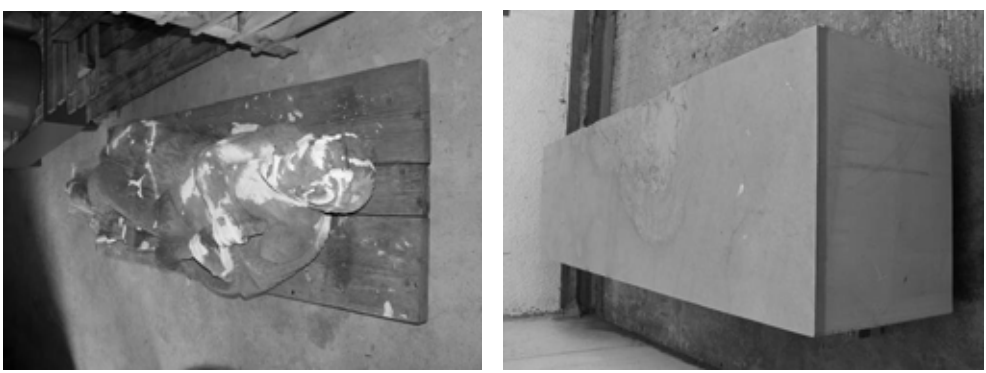


Abb. 6: Originalfigur mit aufgespachtelten Ergänzungen, Sandsteinrohblock, 1 Tonne

Zum Fräsen der Figur waren zwei Aufspannungen erforderlich. Dabei wurde zuerst die Rückseite mit zuvor in der Software ankonstruierten Auflagebalken gefertigt. Anschließend wurde die Figur umgedreht, um die Vorderseite zu bearbeiten.

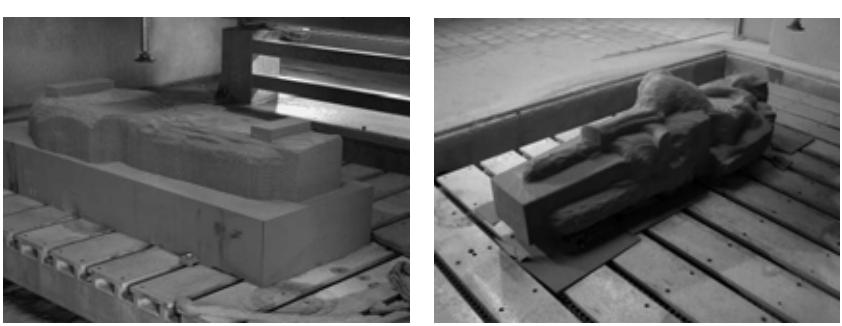


Abb. 7: Fräsen der Rückseite mit ankonstruierten Balken, Fräsen der Vorderseite

Das Fräsen erfolgte in zwei Arbeitsschritten. Nach dem groben Vorfräsen (Schlichten) werden mit einem feineren Werkzeug die Konturen nachgearbeitet. Es bleibt jedoch ein Aufmaß von 3 mm zur händischen Nachbearbeitung.

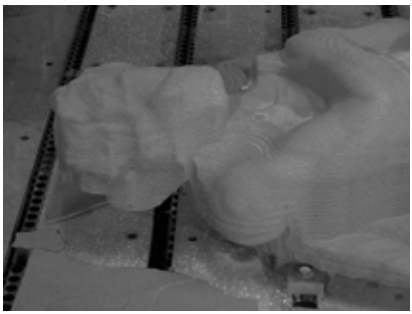


Abb. 8: Detail grobes Schlichten, Detail fertiges Fräsen mit 3 mm Aufmaß

Ein detaillierteres Fräsen der Figur wäre technisch zwar machbar, wirtschaftlich ist es bei Skulpturen dieser Größe aber sinnvoller, die letzte Ausarbeitung händisch vorzunehmen.

Abb. 9: Händische Ausarbeitung des Fräsrohlings mit 3 mm Aufmaß

Durch das 3D-Scanning und das Vorfräsen mittels CNC-Technik werden wesentlich exaktere Kopien von Skulpturen möglich, als durch das herkömmliche händische Kopieren durch Punktieren. Das Fräsen eines Rohlings mit einem bestimmten Aufmaß nutzt die Vorteile der Technik wirtschaftlich aus, wobei dem Steinmetz die letzte Ausarbeitung obliegt.

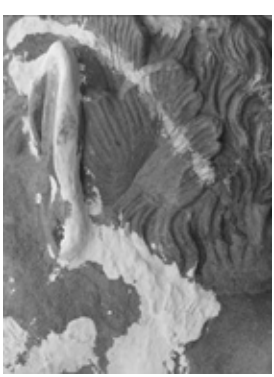


Abb. 10: Detail Originalfigur, Detail Fräsrohling mit 3 mm Aufmaß, Detail Endzustand

Abb. 11: Originalfigur, Fräsrohling mit 3 mm Aufmaß, Endzustand

4 Zusammenfassung

Durch das 3D-Scannen erhält man eine exakte digitale Kopie des Objektes, die jederzeit auch in anderen Maßstäben und Materialien reproduzierbar ist. Städte und Gemeinden können durch die Herstellung von Miniaturen oder Animationen die Daten für Marketingzwecke ebenfalls nutzen. Gleichzeitig sind die Objekte optimal dokumentiert und können in entsprechenden Softwareprogrammen zu Forschungszwecken untersucht und verglichen werden.

Terrestrisches Laserscanning – Messung und Auswertung im Alltag

Michael FLUCH

Zusammenfassung

Anhand eines Straßenvermessungsprojekts werden mess- und auswertetechnische Aspekte des terrestrischen Laserscannings beschrieben. Die Besonderheiten der Messausrüstung ILRIS-3D als auch das Vorgehen in den einzelnen Auswerteschritten mit dem Programmpaket PolyWorks werden geschildert.

1 Einleitung

Der Boumaweg in Groningen, Niederlande, soll den neu entstehenden Europapark mit dem Autobahnzubringer zur A7 verbinden. Die abgeschlossenen Straßenbaumaßnahmen sollten einschließlich aller technischen, verkehrssichernden und verkehrsleitenden Einrichtungen dokumentiert werden. Die beauftragte Vermessungsfirma Azimuth Geodetic Landmeetkundig Ingenieurs Bureau aus Groningen entschied sich für das terrestrische Laserscanning, um diese Aufgaben zu bearbeiten.

Abb. 1: Einmündung Boumaweg – A7, Groningen

Ausschlaggebend für diese Entscheidung waren die schnelle Durchführung der Messungen, die Kompletterfassung und die Arbeitssicherheitsvorschriften. Laut Auftraggeber sollten sich keine Mitarbeiter im Verkehrsraum aufhalten und der fließende Verkehr durfte nicht durch temporäre Geschwindigkeitsbeschränkungen, Teilsperrungen oder Ähnliches behindert werden.

2 Messung

Für die Durchführung der Messungen wurde sich für einen Scanner vom Typ ILRIS-3D entschieden. Der Scanner wird von Optech Inc., Toronto, Kanada hergestellt. Die Ausrüstung für dieses Projekt wurde von der TopScan GmbH, Rheine, zur Verfügung gestellt (TOPSCAN 2005).

Beim ILRIS-3D handelt es sich um einen Camera-View-Scanner mit einem Scanbereich (Field of View) von 40° × 40°. Das Gerät ist sehr einfach und kompakt aufgebaut, die gesamte erforderliche Ausrüstung, einschließlich Stromversorgung und Bediengerät, passt in einen Transportkoffer. Die Bedienung kann kabellos mittels PDA erfolgen, ein Notebook-PC ist vor Ort nicht unbedingt erforderlich. Diese Eigenschaften und das relativ geringe Gewicht erlauben den Transport und die Bedienung durch nur eine Person.

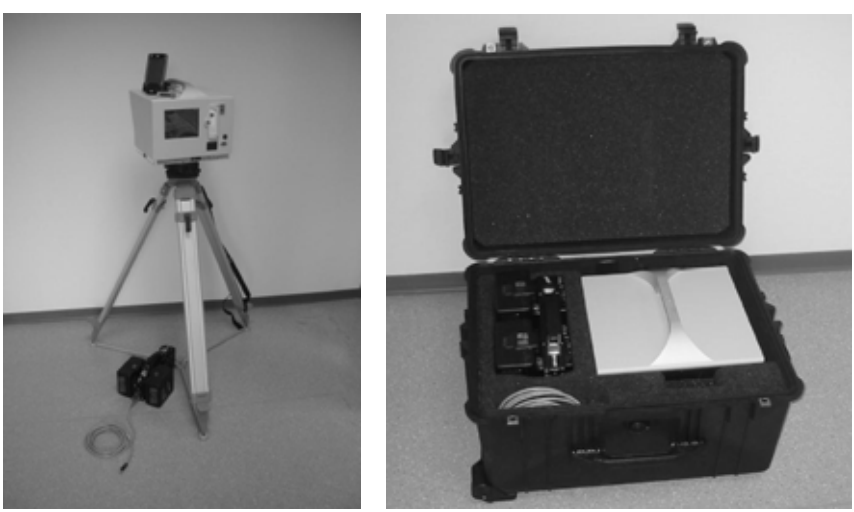


Abb. 2: Terrestrischer Laserscanner ILRIS-3D

Das ILRIS-3D kann sehr hohe Reichweiten auch unter ungünstigen Bedingungen erzielen. Bei nur 20 % Reflektivität eines Objektes kann noch bis in 800 m Entfernung gemessen werden. Dieser Vorteil wird bei diesem Projekt sofort einsichtig, da der dunkle Asphalt schlechte Reflexionseigenschaften aufweist (JENKINS 2004). Eine weitere, wichtige Eigenschaft ist die Augensicherheit nach Laserklasse 1 in allen Betriebszuständen. Deswegen konnte im laufenden Verkehr ohne Warnungen oder Einschränkungen gemessen werden (FLUCH 2005).

Insgesamt wurden aus sieben Scannerpositionen 41 Scans gemessen, wobei ca. 10 Scans Wiederholungen waren, um die Abschattung der Fahrbahn und der Verkehrseinrichtungen insbesondere durch vorbeifahrende Lkw zu minimieren.

Die Arbeiten vor Ort dauerten sechs Stunden, die durchschnittliche geometrische Auflösung betrug 20 mm.

3 Auswertung mit PolyWorks

3.1 Vorstellung PolyWorks

PolyWorks ist ein Produkt der Firma InnovMetric Inc., Quebec, Kanada, die Anfang der 1990er-Jahre gegründet wurde und zurzeit einer der führenden Hersteller von industriell angewandter 3D-Messtechnik Software ist (INNOVMETRIC 2005).

PolyWorks besteht aus den Modulen IMAlign, IMInspect, IMMerge, IMEdit und IMCompress. IMAlign bietet die Möglichkeit der Zusammenführung benachbarter, überlappender Scans auch ohne Signalisierungen durch das so genannte Flächenmatching. Hierbei werden die Geometrieeigenschaften des zu erfassenden Objekts benutzt. IMInspect ist das Mess- und Extraktionsmodul, mit dem sich vielfältige Messaufgaben bearbeiten lassen. Es können Längs- und Querprofile berechnet, geometrische Primitive bestimmt und halbautomatische Linien-, Kanten-, Leitungs- und Rohrverfolgungen berechnet werden. In diesem Modul steht auch eine Sechs-Parameter-Transformation für die Georefenzierung der Punktwolken in übergeordnete Koordinatensysteme zur Verfügung. In IMMerge können polygonale Modelle aufgrund von Punktwolken gerechnet werden. Zur Editierung und Optimierung dieser Modelle kann IMEdit benutzt werden. IMCompress dient der Komprimierung und des Exports dieser Modelle.

Abgesehen von der Vermaschung sind die für die Auswertung von Vermessungsprojekten wichtigsten Module IMAlign und IMInspect. Dementsprechend wird in diesem Beitrag hierauf auch besonders eingegangen. Die Module werden über einen so genannten Workspace Manager gesteuert, der gleichzeitig der Verwaltung der Projekte dient.

3.2 Datenaufbereitung

Zum Scanner wird die Aufbereitungssoftware PARSER mitgeliefert. Hiermit können die binären Rohdaten in verschiedene Weiterverarbeitungsformate gewandelt werden, so auch in das ASCII-Format oder das PolyWorks-Format. Für jeden Messpunkt stehen dann dreidimensionale Koordinaten, Intensitätswerte und je nach PARSER-Version auch Farbwerte zur Verfügung. Das Bild der eingebauten Digitalkamera sowie eine Logdatei mit statistischen Informationen über den Scan können ebenfalls zur Weiterbearbeitung genutzt werden.

Weiterhin können mittels eines Grafikeditors Störreflexionen entfernt werden. Gerade bei diesem Projekt war das ein wichtiger, aber auch zeitintensiver Arbeitsschritt, da der dichte Verkehr mit Fahrzeugen aller Art sehr viele unerwünschte Reflexionen verursachte.

3.3 Zusammensetzung der Einzelscans

In dem PolyWorks Modul IMAlign wurden nun die Einzelscans zu einer Gruppe zusammengesetzt. Hierzu wurden benachbarte, überlappende Scans geladen und auf einem zweigeteilten Bildschirm zunächst ungefähr ausgerichtet. Danach wurden in beiden Scans identische Bereiche – nicht zu verwechseln mit dem in der Vermessungstechnik oft benutzten Begriff der identischen Punkte – ausgewählt und als Startwerte für das so genannte Flächenmatching genutzt. Beim Flächenmatching werden die Scans durch Minimierung der Distanzen zwischen den die Punktwolken beschreibenden Flächen zusammengesetzt. Dieser Arbeitsschritt erfolgt iterativ mit der Möglichkeit der Eingabe von Abbruchkriterien wie Standardabweichungen oder Iterationsanzahl. Zu diesen bearbeiteten Scans wird der nächste Scan geladen, ausgerichtet und mit den anderen Daten zusammengesetzt. Nachdem alle Scans bearbeitet wurden, können in einem weiteren Arbeitsschritt die Restklaffungen über alle Scans verteilt werden.

Abb. 3: Manuell ausgerichtete, benachbarte, überlappende Scans

Für die Qualitätskontrolle dieser Arbeitsschritte können die verbleibenden Differenzen farbcodiert dargestellt werden.

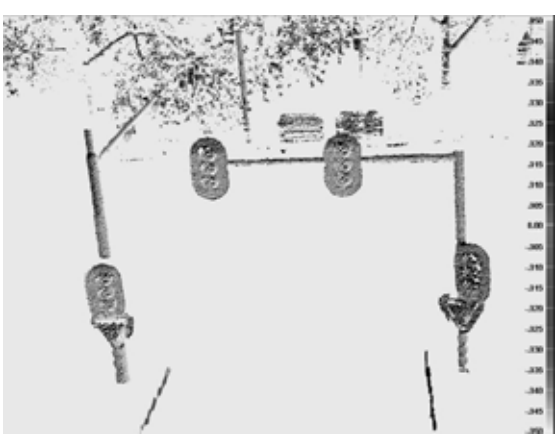


Abb. 4: Zusammengesetzte Scans und Qualitätskontrolle

Als unterstützende Maßnahme bei der Zusammensetzung der Einzelscans können bekannte Scannerstandortkoordinaten eingegeben und/oder Richtungs- und Inklinationswinkeldifferenzen zwischen benachbarten Scans mit berücksichtigt werden.

Auf fast allen Scannerstandpunkten wurde bei diesem Projekt der Scanner zwischen den Scans um die Vertikalachse gedreht. Daher wurde bei der Zusammensetzung der Scans standpunktweise vorgegangen. Anschließend wurden die Teilpunktwolken wiederum über überlappende Bereiche zusammengesetzt.

Da bei diesem Projekt eine Dreh- und Kippvorrichtung nicht benutzt wurde, keine Signalisierungen vorhanden und die Standortkoordinaten nicht bekannt waren, wurde ausschließlich mit dem Flächenmatching gearbeitet und eine durchschnittliche Zusammensetzungsgenauigkeit von 2,5 cm erreicht.

Weitere Details über einzelne Arbeitsschritte können dem Softwarehandbuch entnommen werden (INNOVMETRIC 2004).

3.4 Auswertung der Objektpunktwolke

Die erste Aufgabe der Auswertung war die Transformation der Objektpunktwolke von einem lokalen Koordinatensystem in das niederländische Lage- und Höhensystem.

Die Extraktion der Ampelanlagen und der Einrichtungen ihrer Stromversorgung, aller Verkehrs- und Hinweisschilder, Leitplanken, Straßenbegrenzungen und Markierungen sowie der Einlaufschächte und Kanaldeckel aus der Objektpunktwolke und der Export der extrahierten Daten in das Weiterverarbeitungsprogramm AutoCAD waren die zweite Aufgabe.

Zur ersten Aufgabe standen zwölf Punkte aus vorherigen Vermessungsaufgaben, die in der Objektpunktwolke eindeutig zu identifizieren waren, zur Verfügung. Es handelte sich hierbei um Ampel- und Verkehrsschildmasten, die mit einem reflektorlosen Tachymeter eingemessen worden waren.

Im Modul IMInspect kann der Nutzer eine Vielzahl von geometrischen Primitiven, wie Kugeln, Kreise, Kegel, Flächen, Punkten und Zylinder direkt in der Punktwolke erzeugen.

Zur Erzeugung dieser Primitive muss die entsprechende Teilpunktwolke selektiert werden. Aufgrund der hohen Punktdichte bei terrestrischen Laserscannermessungen kommt es zu Überbestimmungen bei der Primitivbildung, sodass Ausgleichsprozesse zur Anwendung kommen. Es können zwei verschiedene Prozesse gewählt werden. Das so genannte Standard Best-Fit bietet eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate, bei der alle selektierten Punkte berücksichtigt werden. Bei dem so genannten Intelligent Best-Fit ist zusätzlich ein Ausreißertest implementiert.

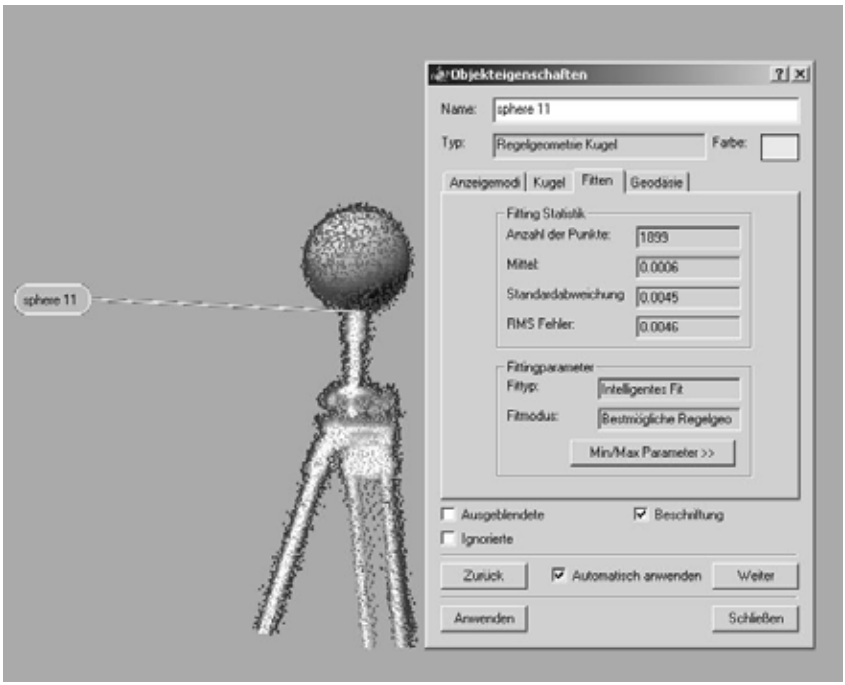


Abb. 5: Geometrisches Primitiv Kugel

Aus den Teilpunktwolken der oben genannten Masten wurden Zylinder gerechnet und deren Mittellinien dann mit der Erdoberfläche geschnitten, um so dreidimensionale Koordinaten zu erhalten. Sind mindestens drei Punkte in beiden Koordinatensystemen bekannt, kann eine Sechs-Parameter-Transformation gerechnet werden. Die Güte der Transformation kann als Differenzen der gerechneten Koordinaten zu den gegebenen Koordinaten bestimmt werden. In diesem Falle betrugen die durchschnittlichen Differenzen ca. 1,5 cm.

Zur Extraktion der oben genannten Einrichtungen, wie z. B. runde Verkehrsschilder, ist ähnlich verfahren worden. Um Straßenmarkierungen und Kanten zu extrahieren, ist die Verwendung von Polylinien notwendig.

Hier bietet IMInspect verschiedene automatisierte Werkzeuge. Durch das Selektieren von zwei Punkten auf einer Kante und durch das Aufziehen eines Suchzylinders lassen sich Bordsteinkanten verfolgen. Gleiches gilt an Intensitätsgrenzen, in diesem Projekt die Straßenmarkierungen. Das Verfolgen von Leitungen und Kabeln ist ebenfalls möglich, fand hier aber keine Anwendung.

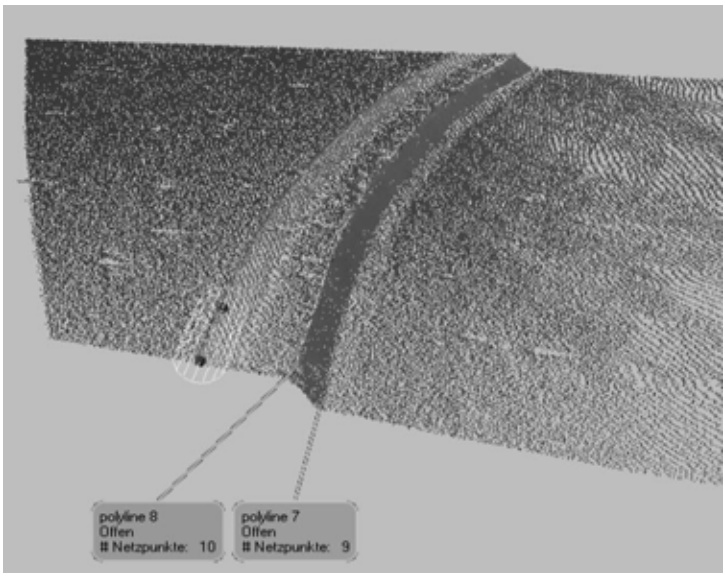


Abb. 6: Erzeugung von Polylinien

Die so gewonnen Informationen lassen sich z. B. im dxf-Format in CAD-Programmen zur Verfügung stellen. In diesem Projekt wurde AutoCAD benutzt und die Ergebnisse dem Auftraggeber übergeben.

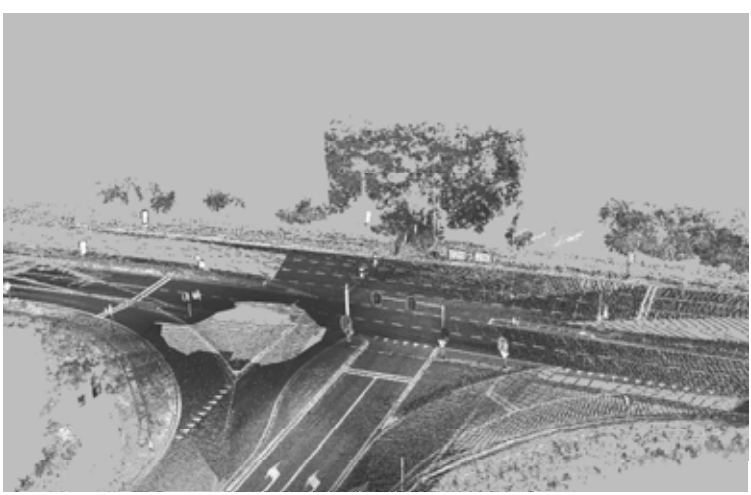


Abb. 7: Objektpunktwolke Boumaweg

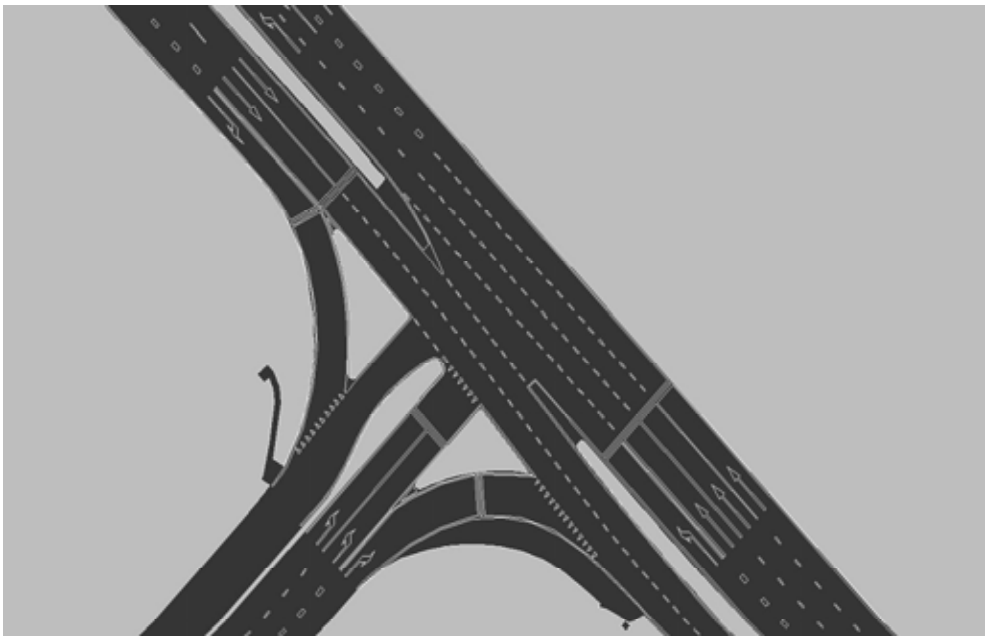


Abb. 8: CAD-Bearbeitung

Literatur

Fluch, M. (2005): *Terrestrisches Laserscanning mit dem ILRIS-3D*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Wichmann Verlag, Heidelberg. 308-315

InnovMetric (2004): *PolyWorks User's Guide for Surveying*, InnovMetric Software Inc., (Februar 2004)

InnovMetric (2005): InnovMetric Software Inc., Quebec, Kanada. www.innovmetric.com, (August 2005)

Jenkins, B. (2004): *New York Power Authority Pilots Laser Scanning on Niagara River Gorge*. Spar Point Research. www.sparllc.com (Mai 2004)

TopScan (2005): TopScan GmbH, Rheine. www.topscan.de (August 2005)

Der neue 3D-Laserscanner CPW 8000 basierend auf der neuen Pulsed-Wave-Technologie von CALLIDUS precision systems

Uwe ILLMANN und Janette LINKE

Zusammenfassung

Inhalt des Beitrages ist die Vorstellung des neuen CALLIDUS CPW 8000, der auf der INTERGEO 2005 in Düsseldorf zum ersten Mal dem internationalen Fachpublikum präsentiert wurde. Der Scanner basiert auf der im Bereich des 3D-Scannings neuen Pulsed-Wave-Technologie, deren Wesen erläutert wird.

1 Einleitung

Die Firma CALLIDUS precision systems stellt mit den Triangulationsscannern CT 180 HR und CT 900 für den Nahbereich zur mikrometergenauen Vermessung von Bauteilen sowie dem CP 3200 für terrestrisches Laserscanning (Distanzmessung nach dem Pulslaufzeitverfahren) verschiedene Laser-Scansysteme für unterschiedliche Einsatzzwecke her. Mit dem CPW 8000 wurde nun ein komplett neuer 3D-Laserscanner zur berührungslosen und dreidimensionalen Vermessung von Objekten und Raumstrukturen entwickelt. Die angewandten Technologien in Hard- und Software ermöglichen die schnelle und automatische Erfassung und Dokumentation eines Objekts sowie die komfortable Generierung von 3D-CAD-Daten aus den aufgenommenen Messwerten.

Abb. 1: Messkopf CALLIDUS CPW 8000

2 Der 3D-Laserscanner CALLIDUS CPW 8000

Dem CPW 8000 liegt als Messverfahren ein patentiertes Kombinationsverfahren aus Pulslaufzeit- und Phasendifferenzmessung zugrunde. Ebenso wie der robuste CP 3200 ist er staub- und spritzwassergeschützt und wird nach DIN EN ISO 9001 gefertigt.

Abb. 2: 3D-Laserscanner CPW 8000

2.1 Eigenschaften

- Der Messkopf ist mit einem Standard-Dreifuß für Vermessungsstative ausgestattet, sodass die Position des Scannermittelpunktes bestimmbar ist.
- Die Grobhorizontierung des Scanners erfolgt mit Libelle, die Restneigung wird über den eingebauten Neigungssensor an den Messwerten korrigiert.
- Die Daten werden während des Messvorgangs (Zwischenspeicherung im Messkopf) auf einem wechselbarem USB-Stick gespeichert.
- Für die Messung der Horizontalwinkel (Orientierung des Messkopfes) und der Vertikalwinkel (rotierender Spiegel) werden Hochpräzisionsinkrementalgeber eingesetzt.
- Die Stromversorgung kann über die Control-Unit (NiMH-Akku) oder extern z. B. über Autobatterie (mit Wandler) erfolgen.

- Für die komfortable Fernsteuerung über Laptop per WLAN oder LAN enthält der Messkopf LAN-Anschluss und WLAN (Antenne auf Messkopf).
- Zur Steuerung des Scanners über die dazugehörige Control-Unit enthält diese eine einfache programmierbare Fernsteuerfunktion.
- Seitlich am Messkopf ist eine automatische Vollpanorama-Farbkamera integriert, die auf die Messeinheit kalibriert wird. Zur Bestimmung der Kameraposition wird ein Hochpräzisionsinkrementalgeber verwendet. Dadurch können die Pixel zur Einfärbung der Punktwolke (fotorealistische RGB-Darstellung) hochexakt zugeordnet werden.
- Der Messkopf ist mit einem Tragegriff ausgestattet, eine hängende Betriebsart ist mittels optionaler Halterung möglich.

2.2 Technische Parameter

Stand: 01.02.2006

Laserklasse	3R (nach EN 60825-1)
Laserwellenlänge	658 nm
Reichweite	80 m
Vertikaler Scanwinkel	300°
Horizontaler Scanwinkel	360°
Minimal einstellbarer Winkelschritt	0,002° = 35 µrad (horizontal und vertikal)
Genauigkeit der Distanzmessung	σ = 2 mm bei 30 m
Divergenz des Laserstrahls	0,2 mrad (entspricht 2 mm pro 10 m)
Durchmesser des Laserstrahls am Austritt	3 mm
Raster der Entfernungswerte (Auflösung)	0,1 mm
Dauer eines vertikalen Scans	20 ms
Scanrate	50.000 Messwerte/Sekunde
Reine Messdauer mit 0,1° Schrittweite	130 s (5,4 Millionen Messpunkte)
Reine Messdauer mit 0,02° Schrittweite	54 min (135 Millionen Messpunkte)
Masse	15 kg
Abmessungen (B x T x H)	495 mm × 167 mm × 313 mm
Umgebungsbedingungen	
Betriebstemperatur	–10 °C bis 50 °C
Lagertemperatur	–20 °C bis 60 °C
Luftfeuchtigkeit	20 % bis 85 % (nicht kondensierend)

Durch den großen vertikalen Scanwinkel von 300° ist eine halbe Umdrehung des Scanners ausreichend, um ein Panorama komplett zu erfassen. Der aus der geringen Strahldivergenz resultierende kleine Laserspot ermöglicht einen hohen Detaillierungsgrad. Da es nicht immer erforderlich ist, das gesamte Objekt in sehr hoher Auflösung zu scannen, können beliebige Winkelbereiche in beliebiger Anzahl mit separaten Einstellungen für die horizontale und vertikale Auflösung definiert werden. Die Software mischt und optimiert die Bereiche automatisch beim Erfassen. Ein nachträgliches Scannen nur in bestimmten Bereichen bzw. interaktive Bereichsauswahl in der Visualisierung (z. B. zum Verfeinern oder Ausdünnen der Messwerte) ist auch möglich. Die Messsoftware läuft sowohl unter Windows (ab 2000) als auch unter Linux. Die erzeugten Messdateien sind binärkompatibel zwischen Windows und Linux.

Für die Korrektur der Entfernungsmessung bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen (Einfluss des Brechungsindex der Luft) können vom Benutzer Umgebungstemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte eingegeben werden.

2.3 Technische Erläuterungen

Auf Basis der verfügbaren Technologien Pulslaufzeit- und Phasenvergleichsverfahren entstand im Ergebnis der Entwicklung der CALLIDUS CPW 8000 mit hybrider Technologie.

Warum war die Entwicklung der Pulsed-Wave-Technologie für terrestrische Laserscanner erforderlich? Die Antwort ergibt sich aus den Anforderungen an diese Geräte – sie sollen Objekte möglichst schnell mit hoher Genauigkeit, großer Reichweite und hoher Auflösung vermessen. Physikalisch und technisch sind jedoch den einzelnen Verfahren Grenzen gesetzt. Da eine für Vermessungszwecke zulässige Laserklasse eingehalten werden muss, kann z. B. die Laserleistung nicht beliebig erhöht werden, um eine höhere Reichweite zu erzielen. Entweder würde sich dadurch die Laserklasse verschlechtern oder bei Einhaltung der gleichen Laserklasse muss die Messgeschwindigkeit reduziert werden (längere Pausen zwischen den einzelnen Impulsen). Tabelle 1 veranschaulicht einige wesentliche Eigenschaften der Messverfahren beim Einsatz in Laserscannern.

Tabelle 1: Vergleich der Verfahren zur Entfernungsmessung beim Laserscanning

	Verfügbare Technologie				**Neue Technologie**	
Messprinzip	Impulslaufzeit-verfahren		Phasenvergleichs-verfahren		Pulsed-Wave-Verfahren	
Genauigkeit	Begrenzt	–	Gut	+	Gut	+
Reichweite	Sehr hoch	++	Gering	–	Hoch	+
Messgeschwindigkeit	Gering	–	Sehr hoch	++	Hoch	+
Eindeutigkeit der Ergebnisse	Gewährleistet	+	Nur im Eindeutigkeitsbereich	o	Gewährleistet	+

Durch eine Kombination von Pulslaufzeit- und Phasenvergleichsverfahren können die Nachteile der einzelnen Verfahren vermieden und damit die Leistungsfähigkeit des Scanners erhöht werden.

Die Pulsed-Wave-Technologie (s. Abb. 3) lässt sich folgendermaßen charakterisieren:

- Für die Distanzmessung werden Laserimpulse erzeugt (vergleichbar mit Pulslaufzeitverfahren) und die (Gruppen-)Laufzeit $t = 2r/c$ zwischen Aussenden und Empfangen des zurückgestrahlten Anteils der Impulse gemessen. Dies ergibt eine Grobmessung der Distanz r, die über die Lichtgeschwindigkeit c im Medium $c = c_0/n$ (Brechungsindex n = Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 zu derjenigen im Medium) aus $r = ct/2 = c_0t/2n$ berechnet werden kann.

- Jeder Impuls wird zusätzlich mit hoher Frequenz moduliert, sodass Pulsgruppen erzeugt werden. Die empfangene Gruppe weist eine Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zur gesendeten Impulsgruppe auf, die gemessen wird (vergleichbar mit Phasendifferenzverfahren). Das Vielfache N der Modulationswellenlänge λ (Mehrdeutigkeitsproblem) braucht hier jedoch nicht mehr berücksichtigt zu werden. Nach JOECKEL & STOBER (1999) ergibt sich die Feinmessung der Distanz r mit $\Delta\varphi = 2r2\pi/\lambda$ zu $r = \Delta\varphi\lambda/4\pi$.
- Die Kombination beider Verfahren liefert eine große Reichweite (wie Pulslaufzeitverfahren) und eine hohe Genauigkeit (wie Phasenvergleichsverfahren). Die Messgenauigkeit beim scannenden Betrieb (abtastender Laserstrahl) wird gegenüber einer kontinuierlichen Messung mit dem Phasenvergleichsverfahren größer, da die Messinformation nur aus dem Raumwinkel stammt, in dem die Impulsgruppe über das Messobjekt streicht. Bei sprunghaften Messwertänderungen (z. B. an Kanten) ist die Unabhängigkeit der aufeinander folgenden Messungen von Vorteil.

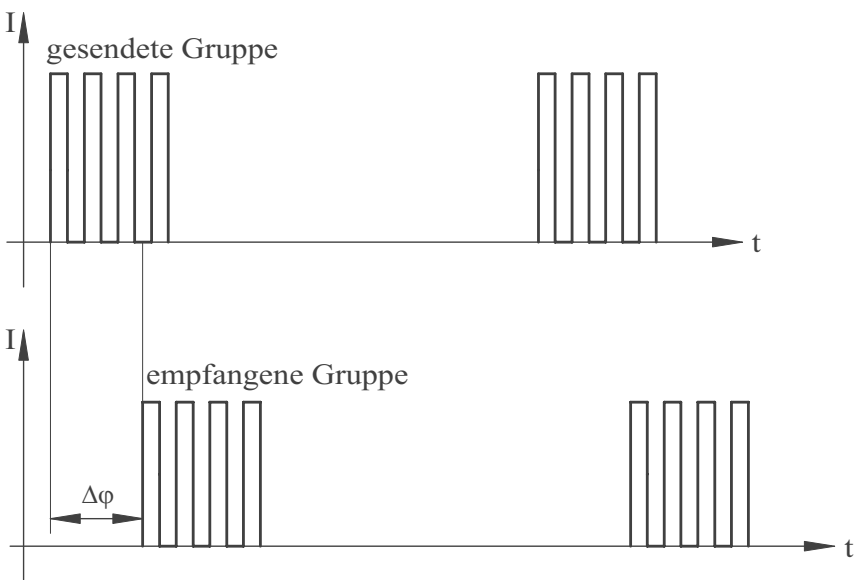


Abb. 3: Pulsed-Wave-Verfahren

Wie bei anderen elektrooptischen Entfernungsmessgeräten sind auch bei den 3D-Laserscannern zwei verschiedene Konfigurationen von Sende- und Empfangseinheit möglich (s. Tab. 2).

Aufgrund der Vorteile wurde beim CALLIDUS CPW 8000 die parallele Anordnung von Sende- und Empfangskanal gewählt.

Tabelle 2: Unterschiede zwischen den Anordnungen von Sende- und Empfangskanal im Scanner

	Axiale Anordnung	**Parallele (biaxiale) Anordnung**
Optische Trennung von Sende- und Empfangskanal	Nein	Ja
Beeinträchtigung des Messsignals durch Reflexionen, die durch Staubpartikel auf dem Scannerfenster verursacht werden	Es treten Messfehler durch die unerwünschte Rückstreuung auf.	Nicht möglich (kein optisches Übersprechen der beiden Kanäle)
Beeinträchtigung des Messsignals durch Staubpartikel in der Umgebung (Reflexionen) bei kurzen Distanzen	Gering bei großem Strahldurchmesser, Groß bei kleinem Strahldurchmesser	Kaum Beeinträchtigung im Nahbereich
Einsatz einer Korrekturlinse für den Nahbereich	Nicht notwendig	Wegen Parallaxe notwendig
Elimination der Störungen (Reflexionen) bei kurzen Distanzen durch die Korrekturlinse	Kaum möglich	Sehr gut

3 Fazit

Mit dem 3D-Laserscanner CPW 8000 ist es gelungen, die Vorteile der Pulslaufzeit- und Phasendifferenzmessung zum Pulsed-Wave-Verfahren zu kombinieren und damit eine im Vergleich zu anderen Scannern höhere Messgenauigkeit bei hoher Messgeschwindigkeit und -auflösung zu erreichen.

Literatur

CALLIDUS precision systems GmbH (2006): http://www.callidus.de

Joeckel, R. & M. Stober (1999): *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wittwer, Stuttgart

Niebuhr, E. (2001): *From the Point to the Surface – The Callidus®-Technology in Theory and Practice*. In: Grün, A. & H. Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques V. Wien. 26-32

Multimodale Sensorfusion auf Basis des Imager 5003

Thomas ABMAYR, Franz HÄRTL, Martin BREITNER,
Markus EHM und Christoph FRÖHLICH

Zusammenfassung

Die in diesem Artikel vorgestellten Methoden sollen aufzeigen, wie die vom IMAGER 5003 gelieferten Sensorinformationen mit den Farbinformationen einer Digitalkamera fusioniert werden können. Dabei wird ein Setup verwendet, welches die Kamera als fest auf den Scanner montiert beschreibt, und in dem Bilder nach Anfahren vordefinierter Positionen ausgelöst werden. Dies vereinfacht und stabilisiert die Fusion der Sensordaten wesentlich. Dabei basiert das eingeführte Fehlermodell auf der Minimierung des Fehlers zwischen korrespondierenden Punkten zwischen Scan und Bildern, welche präzise gefunden werden müssen. Es wird deshalb im zweiten Teil eine Methode zur Suche von lokalen Punktkorrespondenzen vorgestellt, die auf einem korrelationsbasierten Ansatz zwischen Scan- und Bildausschnitt basiert.

1 Einführung

Laserscanner werden mehr und mehr als Vermessungsinstrumente verwendet und bilden heutzutage eine echte, ernstzunehmende Ergänzung zu Techniken wie Tachymetrie und herkömmlicher Photogrammetrie. Der IMAGER 5003 ist ein Laserscanner der modernsten Generation, der ebenso schnell wie präzise misst und in einer Vielzahl von Anwendungen und Umgebungen zum Einsatz kommt. Der IMAGER 5003 misst sowohl Distanz- als auch Reflektivitätsbilder, die zeitgleich aufgenommen werden und die Ausgangdaten für die weitere Verarbeitung liefern. Dieser Artikel soll aufzeigen, wie die Sensordaten des IMAGER 5003 mit den Farbdaten einer „off-the-shelf"-Kamera fusioniert werden können (vgl. dazu auch ABMAYR et al. 2005). Der erste Teil beschreibt das grundlegende Setup und die verwendete Hardware. Darauf aufbauend führt der zweite Teil das verwendete Fehlermodell zur Berechnung der Transformation Kamera/Scanner ein. Unter der Annahme, dass dieses Modell die realen Sensoren Kamera/Scanner hinreichend genau beschreibt, lässt sich die zu erzielende Genauigkeit der Fusion auf die Genauigkeit der

Abb. 1: Die Abbildung zeigt den IMAGER 5003 mit integrierter Farbkamera

Suche korrespondierender Punkte zwischen Scan und Bildern zurückführen. Im dritten Teil wird deshalb eine Methode aufgezeigt, wie solche Punktkorrespondenzen (in einem lokalen Suchraum) präzise gefunden werden können. Die vorgestellte Methode basiert auf einem korrelationsbasierten Ansatz.

Zuerst geben wir eine kurze Beschreibung des Systemaufbaus und führen einige wichtige Definitionen und Notationen ein.

2 Systembeschreibung und Definitionen

2.1 Systembeschreibung

Der grundlegende Aufbau des Scanners besteht aus einem Entfernungsmesssystem und einer Spiegeldeflektionsvorrichtung. Die Deflektionsvorrichtung lenkt den sinusförmig modulierten Laserstrahl in die gewünschte Richtung, wohingegen das Entfernungsmesssystem das zurückgestreute Laserlicht detektiert und aus der Differenz der emittierten und reflektierten Modulationsphase die Entfernung berechnet (= *Phasendifferenzverfahren*).

Ein dreidimensionaler Scan ergibt sich durch Rotation um zwei Achsen: Die erste Rotation dreht den Spiegel um eine horizontale Achse („*Spiegeldrehachse*“) und reflektiert den Laserstrahl folglich vertikal, wohingegen die zweite Rotation um die vertikale Hauptachse des Systems dreht („*Stehachse*“). Die jeweilige Richtung des Laserstrahls wird durch zwei Encoder gemessen: Ein Encoder beschreibt die aktuelle horizontale Drehung und ist um die Stehachse angebracht. Er heißt *Azimutencoder*. Der zweite beschreibt die Spiegeldrehung und ist an der Spiegeldrehachse justiert. Seine Nullstellung ist entlang der negativen Richtung der Stehachse. Er heißt *Elevationsencoder*. Diese beiden Encoder definieren ein Kugelkoordinatensystem, welches *Encoderkoordinatensystem* genannt wird (s. Abb. 2).

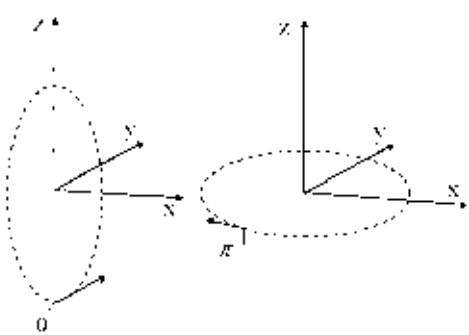


Abb. 2: Die Abbildung zeigt die Nullposition und Richtung des Azimut- und Elevationsencoders bzgl. des Scannerkoordinatensystems. Die Schraffurlinien markieren die zweite Lage (siehe Text).

Der Blickbereich des IMAGER 5003 beträgt 360° im Azimut- und 320° im Elevationswinkel. Um folglich einen Panorama Scan aufzunehmen, ist zwar eine volle Drehung im Elevations- aber nur eine 180° Drehung im Azimutwinkel nötig. Durch den Elevationswinkel wird jeder Scan in zwei Teile geteilt: Der erste Teil beinhaltet alle Daten mit einem Elevationswinkel kleiner oder gleich 180° und heißt *Aufnahme in erster Lage*, wohingegen alle Scanpunkte mit einem Elevationswinkel größer als 180° mit *Aufnahme in zweiter Lage* bezeichnet werden. Indem also ein Scan mit einem Azimutwinkel von 360° aufgenommen wird (und 320° Elevati-

onswinkel), wird die Umgebung doppelt gescannt, sowohl in erster als auch in zweiter Lage.

Zusätzlich zu den Entfernungswerten misst das System auch die Reflektivität der gescannten Oberfläche, und liefert also neben einem *Distanzbild Rg* auch ein korrespondierendes *Reflektivitätsbild Rf*.

Auf den Scanner ist eine digitale Farbkamera fest montiert (s. Abb. 1). In dieser Anwendung wird eine herkömmliche Flächenkamera mit ca. 8 Millionen Pixel (Canon EOS 350D) verwendet: Die Kamera hat eine Auflösung von 2300 × 3450 Pixel und ein 18-mm-Objektiv. Der Farbsensor hat eine Breite bzw. Höhe von 22,2 × 14,8 mm.

2.2 Setup

Die Aufnahme des Scans bzw. der Farbbilder erfolgt sequentiell: Im ersten Schritt die Aufnahme des Scans im für das Farbmapping typischerweise verwendeten Modus: Das heißt, für einen vollen 360 Grad Scan haben die resultierenden Reflektivitäts- bzw. Distanzbilder eine Auflösung von 10.000 Pixel horizontal × 5000 Pixel vertikal; dies entspricht einem Punktabstand von 6,3 mm in 10 m horizontaler Entfernung.

Danach erfolgt die Aufnahme der Farbbilder: Dazu fährt der Scanner vordefinierte Azimutwinkelpositionen an (typischerweise äquidistante Winkel von etwa 20 Grad, abhängig von der Objektivbrennweite bzw. dem Bildfeld der Kamera), und löst danach das Farbbild aus.

Um die resultierenden Sensordaten fusionieren zu können, müssen die realen Sensoren modelliert und die Beziehung zwischen den Sensoren beschrieben werden können. Dazu werden im Folgenden einige Koordinatensysteme eingeführt.

2.3 Koordinaten-Systeme

Bezeichne das Quadrupel

$$K := (a, e_1, e_2, e_3) \tag{1}$$

ein affines, orthogonales und rechtshändiges Koordinatensystem mit der Translation $a \in IR^3$ und den Basisvektoren $e_1, e_2, e_3 \in IR^3$, dann können aufbauend auf dieser Notation die folgenden Koordinatensysteme eingeführt werden:

Zuerst das *Scanner Koordinatensystem*. Bezeichne dazu $k_1 \in IR^3$, $\|k_1\| = 1$ die Elevations- und $k_3 \in IR^3$, $\|k_3\| = 1$ die Azimutrotationsachse. Unter der Annahme, dass sich beide Achsen schneiden mit $\langle k_1; k_3 \rangle = 0$, kann solch ein affines, orthogonales und rechthändiges Koordinatensystem durch

$$K^{(s)} := (0, k_1, k_2, k_3) \tag{2}$$

beschrieben werden.

Ist der Scanner in Ausgangsstellung, d. h. ist insbesondere der Azimutwinkel Null, so definieren wir ein zweites Koordinatensystem durch

$$K_o^{(c)} := (w_0, w_1, w_2, w_3) \quad . \tag{3}$$

Es beschreibt die Lage der Kamera relativ zum Scanner Koordinatensystem und heißt *Kamerakoordinatensystem in Ausgangstellung.* Falls sich die Kamera als ideales Lochkameramodell beschreiben lässt, gilt:

- Der Ursprung des Koordinatensystems w_0 liegt im optischen Zentrum der Kamera
- Der dritte Einheitsvektor w_3 ist orthogonal zur Bildebene
- w_1 ist parallel zur horizontalen- und w_2 zur vertikalen Begrenzung der Bildebene

Dazu bezeichne weiter mit

$$K_0^{(p)} := (q_0, \lambda_1 q_1, \lambda_2 q_2, \lambda_3 q_3) \; mit \; \lambda_i = \frac{w_i}{q_i} \tag{4}$$

das *Pixelkoordinatensystem in Ausgangsstellung*. Der Ursprung q_0 dieses Koordinatensystems liege in einer der Begrenzungen des Bildsensors und q_1 bzw. q_2 entspreche der Pixelbreite bzw. Höhe.

Dreht sich der Scanner um einen vordefinierten Azimutwinkel α um die Stehachse k_3, so dreht sich das Kamerakoordinatensystem ebenfalls um diesen Winkel α um k_3. Bezeichne diese Drehung mit Z_α ,so gilt für dieses Koordinatensystem

$$K_\alpha^{(c)} := (Z_\alpha w_0, Z_\alpha w_1, Z_\alpha w_2, Z_\alpha w_3). \tag{5}$$

Es heißt *Kamerakoordinatensystem gedreht um den Azimutwinkel* α. Ist also die Transformation A zwischen Scannerkoordinatensystem $K^{(s)}$ und Kamerakoordinatensystem in Ausgangsstellung $K_0^{(c)}$ bekannt, so ergibt sich die Transformation in ein beliebiges, um den Winkel α gedrehtes Koordinatensystem aus $A \circ Z_\alpha$. Ebenso definiert sich abschließend das *Pixelkoordinatensystem gedreht um den Azimutwinkel* α durch

$$K_\alpha^{(p)} := (Z_\alpha q_0, Z_\alpha \lambda_1 q_1, Z_\alpha \lambda_2 q_2, Z_\alpha \lambda_3 q_3). \tag{6}$$

Die Beschreibung der funktionalen Beziehung zwischen Scanner und Kamera erfordert die Überführung beider realen Sensoren in ein mathematisches Modell. Das für den Scanner verwendete Modell basiert auf dem aus der Vermessungstechnik bekannten Korrekturmodell für Tachymeter[1].

[1] Das hier vorgestellte Sensormodell ist nicht das von Z+F verwendete Sensormodell, sondern wird hier nur zur exemplarischen Darstellung verwendet.

3 Sensormodellierung

3.1 Modellierung des Scanners

Bezeichne $d = (gv, rg, l, h)$ eine Einzelmessung des Scanners. Dabei sei *gv* der Reflektivitätswert, *rg* der Distanzwert und *l* bzw. *h* der gemessene Azimut- bzw. Elevationsencoderwert. Die Abbildung $\phi_{a,b,c} : [0,2\pi[^2 \times IR^+ \rightarrow IR^3$ vom *Encoderkoordinatensystem in das (kartesische) Scannerkoordinatensystem* $K^{(s)}$ werde mit

$$\phi_{a,b,c} : X = H \circ \left(F \circ G_{a,b,c}(l,h),\ rg \right) \tag{7}$$

bezeichnet. Dabei beschreibt $G_{a,b,c}(l,h) : [0,2\pi[^2 \rightarrow [0,2\pi[^2$ mit

$$G_{a,b,c}(l,h) = \left(l + sign(h-\pi)\frac{a}{\tan(h)} + sign(h-\pi)\frac{b}{\sin(h)},\ h + c \right) \tag{8}$$

die Korrektur des *unkalibrierten Azimutwinkel l* bzw. *Elevationswinkel h* in *kalibrierten Azimutwinkel* $\tilde{\alpha}$ bzw. *Elevationswinkel* $\tilde{\beta}$, $F(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) : [0,2\pi[^2 \rightarrow [0,2\pi[\times [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$ mit

$$F(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) = \begin{cases} (\tilde{\alpha}\ ,\ \tilde{\beta} - \frac{\pi}{2}) & \text{if } \tilde{\beta} \le \pi \\ (\tilde{\alpha}\ ,\ 2\pi - \tilde{\beta} - \frac{\pi}{2}) & \text{if } \tilde{\beta} > \pi \end{cases} \tag{9}$$

die Abbildung vom Encoderkoordinatensystem in das sphärische Scannerkoordinatensystem und

$$H(\alpha, \beta, rg) : [0,2\pi[\times [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[\times IR^+ \rightarrow IR^3 \tag{10}$$

die Transformation von sphärischen- in kartesische Koordinaten. Die Parameter *a,b* und *c* sind sensorspezifische Parameter und korrigieren den in der Tachymetrie unter der Bezeichnung Ziel- Kippachsen- und Höhenindexfehler bekannten Fehler. Die Bestimmung dieser Parameter beruht auf einer Zweilagenmessung und wird z. B. in ABMAYR et al. (2005) oder allgemein für Tachymeter in DEUMLICH & STAIGER (2002) erläutert.

3.2 Modellierung der Kamera

Für die Kamera bezeichne die Abbildung eines im Referenzkoordinatensystem $K^{(s)}$ beschrieben Punktes $X \in IR^3$ in das Pixelkoordinatensystem $K_\alpha^{(p)}$ der Kamera mit

$$\Xi_\alpha : IR^3 \rightarrow IR^2\ ;\ (u,v) = \nu_{\kappa_1,\kappa_2,\lambda_1,\lambda_2} \circ \varphi_{s_x,s_y,c_x,c_y} \circ \hbar \circ R(Z_\alpha \cdot X + T)\ . \tag{11}$$

Dabei beschreibt R eine Drehung und T eine Translation und definiert zusammen die Transformation vom Scannerkoordinatensystem $K^{(s)}$ in das Kamerakoordinatensys-

tem $K_0^{(c)}$, und mit Z_α den oben eingeführten Basiswechsel von $K_0^{(c)}$ in das um α gedrehte Koordinatensystem $K_\alpha^{(c)}$. Die darauf folgende perspektivische Projektion von $K_\alpha^{(c)}$ auf die „normalisierte“ Bildebene wird durch

$$\hbar : (p_n, q_n) = \left(\frac{x}{z}, \frac{y}{z} \right), \quad für \;\; z \neq 0 \tag{12}$$

definiert. Weiter bezeichne $\varphi_{s_x, s_y, c_x, c_y} : IR^2 \to IR^2$ mit

$$\varphi_{s_x, s_y, c_x, c_y} : (p_r, q_r) = \left(c_x + s_x p_n \;,\; c_y + s_y q_n \right) \tag{13}$$

die Transformation von der „normalisierten“ Bildebene auf die „reale“ Bildebene, sowie den Übergang von metrischen Koordinaten in Pixelkoordinaten. Dabei beschreibt c_x, c_y die Lage des Bildhauptpunktes und s_x den Skalierungsfaktor (und damit die Brennweite und Pixelausdehnung). Sind die Pixel quadratisch, so gilt $s_x = s_y$. In dem hier verwendeten Modell nach Zhang wird sowohl radiale als auch tangentiale Verzeichnung korrigiert: So definiert mit $r = \sqrt{p_n^2 + q_n^2}$

$$\varphi_{\kappa_1, \kappa_2, \lambda_1, \lambda_2} : (p_d, q_d) = \begin{pmatrix} p_r \left(1 + \sum_{i=1}^{2} \kappa_i \, r^{2i} \right) + 2\lambda_1 p_r q_r + \lambda_2 (r^2 + 2 {p_r}^2) \\ q_r \left(1 + \sum_{i=1}^{2} \kappa_i \, r^{2i} \right) + \lambda_1 (r^2 + 2 {q_r}^2) + 2\lambda_2 p_r q_r) \end{pmatrix} \tag{14}$$

die Rückprojektion eines verzeichnungsfreien Punktes (p_r, q_r) in einen verzeichnungsbehafteten Punkt (p_d, q_d).

Da *R* durch eine orthogonale Matrix und damit durch drei Parameter beschrieben werden kann, bekommen wir insgesamt 15 Parameter die das Modell beschreiben: α gibt nach Aufbau des Setups (vgl. Kapitel 2.2) die aktuelle Position des Azimutwinkels an und ist somit bekannt. $\kappa_1, \kappa_2, \lambda_1, \lambda_2, s_x, s_y, c_x, c_y$ sind kameraspezifisch und heißen *innere Kameraparameter*. Sie sind unabhängig von der aktuellen Position des Kamerakoordinatensystems $K_\alpha^{(c)}$. Wie diese Parameter korrigiert werden können, wird beispielsweise in ZHANG (1999) dargestellt.

Schließlich beschreiben *R* und *T* die Position des Kamerakoordinatensystems $K_0^{(c)}$ relativ zum Scannerkoordinatensystem $K^{(s)}$. Sie heißen im Folgenden *externe Kameraparameter*. Sind die scannerspezifischen Parameter *a,b,c* und die inneren Kameraparameter $\kappa_1, \kappa_2, \lambda_1, \lambda_2, s_x, s_y, c_x, c_y$ bekannt, so fehlt zur vollständigen Beschreibung der Beziehung zwischen Scannerkoordinatensystem $K^{(s)}$ und Kamerakoordinatensystem $K_\alpha^{(c)}$ nur noch die Bestimmung der externen Kameraparameter *R* und *T*. Dazu das folgende Kapitel.

3.3 Bestimmung der externen Kameraparameter

Gegeben seien die scannerspezifischen Parameter *a,b,c* und die inneren Kameraparameter $\kappa_1, \kappa_2, \lambda_1, \lambda_2, s_x, s_y, c_x, c_y$, sowie ein Scan *S* mit Bildern $(I_0,..,I_n)$ und deren Azimutwinkelpositionen $(\alpha_0,..,\alpha_n)$. Weiter seien *m* Messungen $(d_0,..,d_m)$ im Scan gegeben. Sei der zu einer Messung d_j korrespondierende Punkt im *i*-ten Bild mit $p_{ij} = (u_{ij}, v_{ij})$ bezeichnet, falls er existiert ($p_{ij} = \varnothing$ sonst). Definiere so die Menge *M* mit $M = \{..,(d_k, p_{kl}),..,(d_p, p_{pq}),..\}$ als die Menge aller Tupel, für die $p_{ij} \neq \varnothing$. Das Fehlermodell

$$\sum_{(d_i p_{ij}) \in M} \left\| \Xi_{\alpha_j} \circ \phi_{a,b,c}(l_i, h_i, rg_i) - p_{ij} \right\|_2 \quad \underset{R,T}{\rightarrow} \quad \min \tag{15}$$

wird bei Kenntnis hinreichend guter Startwerte für *R,T* als nichtlineares Optimierungsproblem gelöst.

Das hier vorgestellte Fehlermodell basiert auf der Minimierung des (quadratischen) Fehlers zwischen korrespondierenden Punkten in Scan und Bildern. Deren präzise Bestimmung wird im nächsten Abschnitt erläutert. Die vorgestellte Methode basiert auf einem korrelationsbasierten Ansatz.

4 Lokale Suche von Punktkorrespondenzen

Bezeichne jetzt mit $d_{ij} = (gv_{ij}, rg_{ij}, l_{ij}, h_{ij})$ eine Einzelmessung eines Scans, mit $S := (d_{00},..,d_{MN})$ einen Scan und mit $\widetilde{S} := (u_{\min}, u_{\max}) \times (v_{\min}, v_{\max}) \subset S$ einen Ausschnitt des Scans. Werde $\widetilde{S}$ so gewählt, dass darin eine „markante Umgebung“ liegt. Bezeichne weiter mit $d_{xy} = (gv_{xy}, rg_{xy}, l_{xy}, h_{xy})$ den in dieser Umgebung liegenden, gesuchten Messpunkt[2] und mit $p_k = (u_k, v_k)$ den zu d_{xy} korrespondierenden Punkt im *k*-ten Bild[3] I_k. Im Folgenden wird gezeigt, wie das Tupel (d_{xy}, p_k) präzise gefunden werden kann.

---

[2] Beachte hierbei, dass nicht gefordert wird, dass d_{xy} markant ist. Es wird nur gefordert, dass d_{xy} in einer markanten Umgebung liegt.

[3] Um den formalen Notation zu erleichtern, wird im Folgenden das Farbbild I_k als Grauwertbild interpretiert.

Abb. 3: Bild a) zeigt links das Reflektivitätsbild des Scanauschnittes, daneben das in das Scannerkoordinatensystem transformierte Farbbild $I_k^{(t)}$. Bild b) zeigt die Gradientenbetragsbilder. Die roten Kreuze markieren die Position optimaler Übereinstimmung; das pinke Kreuz in a) zeigt den verbliebenen, zu minimierenden Fehler. (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

Gegeben seien dazu wiederum die inneren Kalibrierparameter $\kappa_1, \kappa_2, \lambda_1, \lambda_2, s_x, s_y, c_x, c_y$ der Kamera sowie die Kalibrierparameter *a,b,c* des Scanners. Außerdem seien hinreichend gute Startwerte der externen Kameraparameter *R* und *T* gegeben. Wähle eine Teilmenge $S' := (u'_{\min},..,u'_{\max}) \times (v'_{\min},..,v'_{\max}) \subset \widetilde{S}$. Setzt man $p := i - u'_{\min}$, $q := j - v'_{\min}$ dann beschreibt für alle $d_{ij} \in S'$

$I_{pq}^{(t)} := I_k\left(\Xi_{\alpha_k} \circ \phi_{a,b,c}(l_{ij}, h_{ij}, rg_{ij})\right)$ die Transformation des *k*-ten Bildes vom Pixelkoordinatensystem $K_{\alpha_k}^{(p)}$ in das Scannerkoordinatensystem. Da *R* und *T* nur Startwerte bilden, stimmen das Reflektivitätsbild des Scans und das Bild $I^{(t)}$ zwar perspektivisch überein, sind aber gegeneinander „verschoben“ (s. Abb. 3).

Gesucht ist jetzt die Position im Scanausschnitt $\widetilde{S}$, deren Maß an Übereinstimmung mit dem Bild I_k im Sinne eines zu definierenden Gütekriteriums maximal ist. Die vorgestellte Methode basiert auf einem korrelationsbasierten Ansatz. Da die Grauwertverteilung in Scan und Farbbild aufgrund der unterschiedlichen Sensoren sehr unterschiedlich sein kann, wird im Folgenden nicht auf den Grauwert-, sondern auf den Gradientenbetragsbildern gearbeitet.

Definiere dazu diskrete Ableitungsoperatoren auf Grauwertbildern

$$\Delta_f^{(x)}(i,j) := \frac{1}{2}\left(f(i-1,j) - f(i+1,j)\right) \quad \text{und} \quad \Delta_f^{(y)}(i,j) := \frac{1}{2}\left(f(i,j-1) - f(i,j+1)\right) \tag{16}$$

und setze als Gradientenbetragsoperator

$$\nabla_f(i,j) := \sqrt{\Delta_f^{(x)}(i,j)^2 + \Delta_f^{(y)}(i,j)^2}\ . \tag{17}$$

Definiere darauf ein „Gütebild“ zwischen Reflektivitätsbild *Rf* des Scans und Bild $I^{(t)}$ durch

$$\Theta_{nm} := \begin{cases} \sum_{(i,j)\in\tilde{S}} \nabla_{Rf}(n-i,m-j)\nabla_{I^{(t)}}(i,j) \;\; falls\;(n-i,m-j)\in\tilde{S} \\ 0 \;\; sonst \end{cases} . \tag{18}$$

Dann ist $\Theta_{pq} := \max(..,\Theta_{ij},..)$ die Position maximaler Übereinstimmung[4]. Setze $u := 2^{-1}\left(u'_{\max} - u'_{\min}\right) + u'_{\max}$ und $v := 2^{-1}\left(v'_{\max} - v'_{\min}\right) + v'_{\max}$. Dann ist das gesuchte Tupel definiert durch $d_{xy} := d_{pq}$ und $p_k := \Xi_{\alpha_k} \circ \phi_{a,b,c}\left(h_{uv}, l_{uv}, rg_{uv}\right)$.

5 Ergebnisse und Diskussion

In unserem Versuchsaufbau wurde die Kamera in äquidistanten Abständen von horizontal 20 Grad ausgelöst, wie in Kapitel 2.2 beschrieben. Dann wurden mit der in Kapitel 4 dargestellten Methode elf gut verteilte, markante Punkte im Scan manuell gewählt. Da aufgrund der Überlappung der Bilder einige markante Punkte Korrespondenzen in zwei Bildern hatten, ergab dies eine Ausgangsbasis von 17 Punktkorrespondenzen. Die Ergebnisse nach der Registrierung sind in Abbildung 4 als eine Überlagerung von Scan und gemappten Farbbild bzw. als farbige Punktwolke dargestellt.

Mit diesen Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass die Fusion mit den verwendeten Sensoren (dies gilt insbesondere für die „off-the-shelf“-Kamera) bei exakter Wahl der Punktkorrespondenzen genau und präzise ist.

Abb. 4: Das Ergebnis nach der Registrierung: Im linken Bild wurden die Farbdaten in das Scannerkoordinatensystem projiziert und dann schachbrettartig im Wechsel mit den Scandaten dargestellt. Das rechte Bild zeigt das Ergebnis der Registrierung, dargestellt als farbige Punktwolke. (Farbabbildung siehe beiliegende CD)

[4] Durch lokale Approximation dieses Gütebildes mit z.B. einem quadratischen Polynom lässt sich Subpixelgenauigkeit erreichen.

6 Danksagung

Teile dieser Arbeit entstanden im Rahmen des Forschungsprojektes ModoS. Deshalb danken wir den beteiligten Forschungsinstituten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Berlin und Oberpfaffenhofen. Insbesondere bedanken wir uns bei der 3D Modellierungsgruppe am Institut für Robotik und Mechatronik von Herrn Prof. Hirzinger für die erfolgreiche und gute Kooperation. Unser ganz besonderer Dank gilt der Laserentwicklungsabteilung bei Z+F um Markus Mettenleiter für ihre hervorragenden Entwicklungsarbeiten am IMAGER 5003.

Literatur

Abmayr, T., Dalton, G., Härtl, F. , Hines, D., Liu, R., Hirzinger, G. & C. Fröhlich (2005): *Standardisation and visualization of 2.5D scanning data and rgb color information by inverse mapping.* 7th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Vienna, Austria

Deumlich, F. & R. Staiger (2002): *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik.* 9. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Fröhlich, C. (1996): *Aktive Erzeugung korrespondierender Tiefen- und Reflektivitätsbilder und ihre Nutzung zur Umgebungserfassung.* 1. Auflage; Pro Universitate Verlag

Zhang, Z. (1999): *Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane from Unknown Orientations.* International Conference on Computer Vision (ICCV'99), Corfu, Greece. 666-673

Entwicklungen in der Zusammenführung boden- und luftgestützter Laserscanner- und Kameradaten

Andreas ULLRICH und Nikolaus STUDNICKA

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt Strategien zur Zusammenführung von Daten, die durch Laserscannervermessung und digitale Fotografie gewonnen wurden. Die Aufnahme erfolgte sowohl von luftgestützten (airborne) als auch von stationär bodengestützten (terrestrial) Plattformen. In einer Vielzahl von Anwendungen wird gefordert, die Zusammenführungen (Referenzierung) von Scandaten mit möglichst wenigen Passpunkten durchzuführen. Dies ist nur möglich, wenn die eigentlichen Nutzdaten zur Registrierung herangezogen werden. Der aus diesen Überlegungen entwickelte Bündelblockausgleich mit einem integrierten, modifizierten ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point) wird in diesem Beitrag vorgestellt und dessen Anwendung an einem konkreten Messobjekt diskutiert. Als Datengrundlage werden sowohl ALS-Datensätze (Airborne Laser Scanning) aus Befliegungen von Dresden per Hubschrauber und Flugzeug als auch die von einer TLS-Messkampagne (Terrestrial Laser Scanning) stammenden Daten der Frauenkirche herangezogen.

1 Datenaufnahme

1.1 Aufnahmezeiten und Aufnahmeorte

Am 30. Mai 2005 wurden Teile von Dresden von der Milan Flug GmbH im Zuge einer Elbe-Befliegung aus einer Höhe von ca. 654 m über dem Meeresspiegel vermessen.

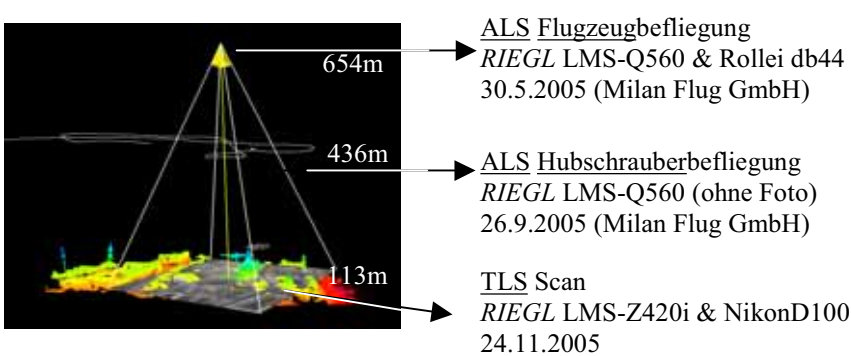


Abb. 1: Flugtage und -höhen der Scan- und Bildaufnahmen

Hierbei wurden auch digitale 16-Megapixel-Luftbilder aufgenommen. Unmittelbar vor der Weihe der Frauenkirche (30.10.2005) ist am 26. September 2005 von der Milan Flug GmbH das Gebiet per Hubschrauber in 436 m Höhe, also ca. 232 m über der Kuppelspitze,

beflogen worden. Dabei wurden Laserscandaten mit einem *RIEGL* 2D Laser Scanner LMS-Q560 (RIEGL 2006) aufgenommen. Am 24. November 2005 wurden von einer mobilen Plattform aus die Fassaden der Frauenkirche mit einem *RIEGL* 3D Laser Scanner LMS-Z420i (RIEGL 2006, ULLRICH et al. 2002) in einer kombinierten Scan-Fotoaufnahme vermessen. Die verschiedenen Aufnahmetage und -höhen zeigt Abbildung 1. Zu beachten ist, dass das Luftbild bereits in die Abbildung eingefügt wurde.

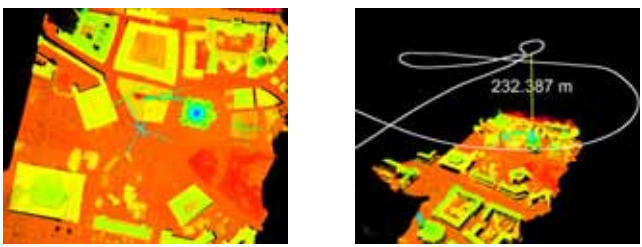


Abb. 2: Trajektorie des Hubschrauberfluges in Bezug zu dem daraus gewonnenen Datensatz, dargestellt als höhencodierte Punktwolke

Abbildung 2 zeigt die Trajektorie des Hubschrauberfluges und die Punktwolke des daraus gewonnenen Datensatzes. An den bewegten Kränen kann man ersehen, dass Daten aus insgesamt drei Flugspuren zusammengesetzt wurden. Die Farbe codiert die Höhe: blau an der Kuppelspitze (204 m über dem Meer) und rot eine tiefer liegende Grabungsfläche (108 m).

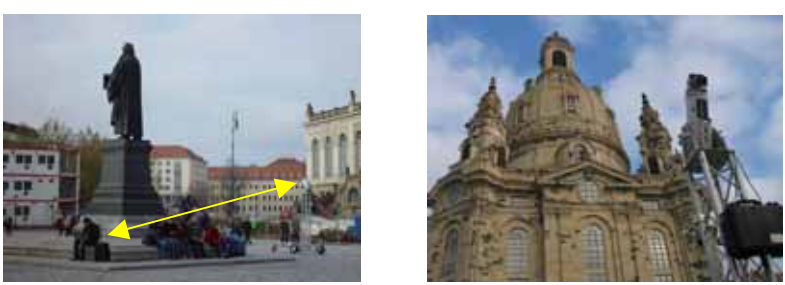


Abb. 3: *RIEGL* LMS-Z420i auf einer mobilen Plattform, gesteuert durch einen Laptop, verbunden durch eine kabellose Netzwerkverbindung (WLAN)

Mit dem auf einer mobilen Plattform montierten terrestrischen Laserscanner wurden von insgesamt 14 stationären Positionen aus die Scan- und Fotodaten aufgenommen (STUDNICKA 2004). Abbildung 3 zeigt den Systemaufbau mit der WLAN-Verbindung zwischen Scanner, über USB angebundenen Fotoapparat und Laptop. Der Scannerkopf wurde jeweils so geneigt, dass der relevante Teil der Fassade stets zur Gänze in der Höhe in den kalibrierten Fotos sichtbar war. Während der Einsatzzeit von gesamt sieben Stunden wurde das ganze Messsystem von nur einem Mann bedient. Der eingesetzte Wagen ist zerlegbar und kann bequem mit allen Messgeräten in einem üblichen Kombi-Pkw transportiert werden.

Die Scannerstandorte (vgl. Abb. 4) wurden so gewählt, dass die in einem einzelnen Scan auftretenden Scanschatten auf der Fassade durch Messpunkte der übrigen Scans bestmöglich aufgefüllt werden konnten. Hierzu ist es notwendig, die Scanpositionen bereits während der Datenaufnahme aufeinander zu referenzieren und als ausgedünnte Punktwolke vor der neuen Positionierung des Scanwagens am Laptop darzustellen. Als Verknüpfungspunkte dienten Retroreflektorscheiben mit 5 cm Durchmesser, die allesamt mit hoher Auflösung („tiepoint scan“) gescannt wurden.

Abb. 4: Das linke Bild zeigt die 14 Scannerstandpunkte und ihre Verknüpfungen über Passpunkte. Die Retroreflektorscheiben (siehe Mitte) wurden fein abgescannt, mit einem kleinen Zusatzblitz bei der Ablichtung aufgehellt und darüber hinaus per Totalstation eingemessen (rechtes Foto).

Angehörige der TU Dresden haben sich bereit erklärt, fünf der insgesamt 36 Reflektormarken im Gauss-Krügersystem (5. Meridianstreifen) zu georeferenzieren. Die Kalibrierung des 6 Megapixel Fotoapparates Nikon D100/14mm (RIEGL 2003) wurde kontinuierlich kontrolliert, indem die Scan-Passpunktdaten in die Fotos eingeblendet wurden. Die Abweichungen lagen im gesamten Projekt bei unter einem Pixel.

1.2 Systembeschreibung

Abb. 5: Die Plattformen für das ALS-System: Cessna 207 und Helikopter (Eurocopter)

Für die Befliegungen durch die Milan Flug GmbH wurde der „full waveform“ (WAGNER 2004) *RIEGL* LMS Q560 2D Laser Scanner in Kombination mit einer 16 Megapixel Rollei Kamera verwendet. Das Gesamtsystem mit GPS-Empfänger und einer Trägheitsmesseinheit ist so auf einer vibrationsarmen Plattform integriert, das es in einem Stück, rasch und exakt reproduzierbar zwischen verschiedenen Fluggeräten gewechselt werden kann. Die Spezifikation des ALS-Systems findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Spezifikation des ALS-Systems

Befliegungsunternehmen	Milan Flug GmbH, Deutschland
Fluggeräte	Cessna 207, Helikopter (Eurocopter)
Flughöhe, -geschwindigkeit	ca. 300 m ü.G., 0 – 160 km/h
ALS-Scanner	*RIEGL* LMS-Q560
Messentfernungsbereich	30 m – 1500 m bei Zielreflektivität 80 % 30 m – 850 m bei Zielreflektivität 20 %
Genauigkeit / Mehrzielaufl.	20 mm / bis zu 0,5 m
Messrate	100.000 Messungen/sec (Burstrate)
Scanbereich, -geschwindigkeit	45°(bis zu 60°), bis zu 100 Zeilen / sec
Abmessungen / Gewicht	560 × 200 × 217 mm/20 kg
Augensicherheit	Laserklasse 1 / Wellenlänge im nahen Infrarot
Fotokamera	Rollei db44 metric , 4K × 4K-Sensor
Objektiv	50 mm

Der terrestrische 3D Laser Scanner *RIEGL*-Z420i wurde in folgender Konfiguration zum Einsatz gebracht:

Tabelle 2: Spezifikation des TLS-Systems

Hauptmerkmale der aufgesetzten Digitalkamera	
Kameramodell	z. B. Nikon D100, 6 MegaPixel
Brennweite, Aufnahmebereich	14 mm / 2,8, 80 deg × 58 deg
Hauptmerkmale des 3D Laser Scanners LMS-Z420i	
Einsatzreichweite	bis zu 1000 m (Reflektivität 80 %)
Entfernungsmessgenauigkeit	10 mm / 5 mm (Einzelmessung / Mittelung)
Strahldurchmesser	25 mm @ 100 m Entfernung
Messrate	8000 Messungen/sec
Aufnahmebereich	0 bis 80 Grad vertikal, 0 bis 360 Grad horizontal
Winkelauflösung	0,002 Grad

1.3 Beschreibung des Registrierungsansatzes

Liegen Laserscandaten aus der bodengestützten Datenerfassung (*terrestrial laser scanning*, TLS) vor, die von unterschiedlichen Standpunkten aus aufgenommen wurden, so besteht vor einer Weiterverarbeitung stets die Notwendigkeit, diese in einem gemeinsamen Koordinatensystem zu registrieren. In dem Softwareprodukt RiSCAN PRO ist dieses gemeinsame Koordinatensystem das so genannte Projektkoordinatensystem. Die Registrierung der einzelnen Scanpositionen wird jeweils durch eine Transformation mit sechs Freiheitsgraden beschrieben, drei Rotations- und drei Translationsfreiheitsgrade. Ist die Bestimmung dieser Transformation durch den Vorgang der Registrierung erfolgt, so kann jeder Messpunkt

eines Scans, ursprünglich im scannereigenen Koordinatensystem vorliegend, in das gemeinsame Projektkoordinatensystem transformiert werden.

Ist der Scanner darüber hinaus mit einer Digitalkamera ausgestattet, deren innere und äußere Orientierung durch Kalibrierung und Messung während der Datenerfassung bekannt ist, wie zum Beispiel bei dem eingesetzten *RIEGL* LMS-Z420i, so kann der zu jedem Pixel der Bilder korrespondierende Sehstrahl ebenfalls eindeutig und unmittelbar in das Projektkoordinatensystem transformiert werden.

Besteht darüber hinaus die Notwendigkeit einer Einbettung des Projektkoordinatensystems in ein übergeordnetes Koordinatensystem, zum Beispiel in das WGS84-System, so kann dies mittels Passpunkten durchgeführt werden, deren Koordinaten im Projektkoordinatensystem und im übergeordneten Koordinatensystem bekannt sind.

Für Laserscandaten aus der luftgestützten Datenerfassung (*airborne laser scanning*, ALS) besteht stets die Notwendigkeit einer Transformation in ein geostationäres Koordinatensystem. Diese Transformation erfolgt unter Ausnutzung von Daten, die mit einem mit dem Lasermesssystem starr verbundenen Trägheitsmesssystem (*inertial measurement unit*, IMU) in Kombination mit einem Positionsmesssystem (*global positioning system*, z. B. GPS) gewonnen werden. Zur Optimierung der Messgenauigkeit werden die Navigationsdaten mit den Daten einer nahe liegenden geostationären Referenzstation (auch als Basisstation oder *base station* bezeichnet) kombiniert. Die mit ALS-Systemen maximal erzielbare absolute Messgenauigkeit wird aktuell mit etwa ±10 cm horizontal und ±15 cm vertikal angegeben, wobei diese Genauigkeit durch die des inertialen Navigationssystems, bestehend aus IMU, GPS und Referenzstation, limitiert ist.

Vielfach werden Daten aus ALS-Befliegungen in einer Vielzahl von Flugstreifen erfasst. Über eine Ausgleichung der Daten aller erfassten Flugstreifen in überlappenden Bereichen kann ein in sich konsistenter Datensatz gewonnen werden. Die absolute Messgenauigkeit ist durch diesen Vorgang aber nicht zu steigern. Sollen nun ALS-Daten mit TLS-Daten kombiniert werden, so ist bei der Registrierung aller Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem, vorzugsweise dem WGS84-System, eine Ausgleichung des in sich stimmigen ALS-Datensatzes mit dem in sich stimmigen und hochgenauen TLS-Datensatz erforderlich, wie in dem Beispiel in diesem Beitrag vorgeführt.

Der Vorgang der Registrierung von TLS- und ALS-Daten lässt sich in folgende Teilaufgaben unterteilen:

- Registrierung der bereits in sich stimmigen TLS-Daten in einem globalen Koordinatensystem, zum Beispiel WGS84, über einige wenige Passpunkte
- Aufbereitung der ALS-Daten über eine Zusammenführung der Laserscandaten mit den bereits aufbereiteten Daten des inertialen Navigationssystems. Eine Ausgleichung der Flugstreifen zueinander, die sowohl Parameter einer Systemkalibrierung modifizieren als auch Navigationsdatenabweichungen modellieren kann, führt zu einem in sich stimmigen ALS-Datensatz.
- Zusammenführung der beiden Datensätze unter Freigabe von zumindest sechs Freiheitsgraden für den ALS-Datensatz

Für die Registrierung der TLS-Daten werden folgende alternative Ansätze verwendet (siehe auch RIEGL et al. 2003, STUDNICKA et al. 2004):

- Anbringung von retro-reflektierenden Zielen (signalisierte Punkte) in der zu erfassenden Szene. Automatische Erkennung der Ziele in den Scandaten und automatisierte Vermessung der Ziele mit dem Laserscanner. Automatische, bestmögliche Extraktion der Position der Ziele im scannereigenen Koordinatensystem. Automatische Verknüpfung (Verlinkung) der signalisierten Punkte. Bestimmung der Transformationen und damit Registrierung der Scanpositionen im Projektkoordinatensystem. Die Bestimmung der Transformationen für alle Scanpositionen kann für diese gleichzeitig in einem verketteten Ausgleich erfolgen. Ergänzend können Messungen in kalibrierten Bildaufnahmen mitberücksichtigt werden.
- Vorregistrierung der Scanpositionen, zum Beispiel durch Nutzung der Daten der internen Neigungssensoren und eines Kompasses, oder durch Verwendung manuell zu identifizierender Passpunkte aus den Scandaten, oder, falls vorhanden, Messungen auf signalisierte Punkte. Zusätzlich können auch Passpunkte in den Bildern der kalibrierten Kamera verwendet werden. Einsatz von ICP-Algorithmen zur hochgenauen Registrierung der Laserscandaten über eine Minimierung der Abweichungen von Scandaten in Überlappungsbereichen. Diese Vorgehensweise, speziell der zur Anwendung gebrachte modifizierte ICP-Algorithmus, wird nachfolgend näher erläutert.

Die beiden Ansätze unterscheiden sich vor allem in der Art der verwendeten Daten. Im ersten Ansatz werden Messungen auf Ziele verwendet, die nicht zu den eigentlichen Nutzdaten zählen. Diese signalisierten Punkte können aber, sofern konventionell in einem übergeordneten System vermessen, sogleich zu einer „globalen“ Registrierung verwendet werden. Im zweiten Ansatz beruht die Registrierung auf den Nutzdaten und führt damit auch zur höchstmöglichen Stimmigkeit der Nutzdaten nach der Registrierung. Für eine globale Registrierung sind einige wenige signalisierte Punkte in der Praxis dennoch erforderlich.

Der für die Registrierung zum Einsatz gebrachte ICP-Algorithmus ist im strengen Sinn kein *iterative closest point* Algorithmus, da nicht die Abstände korrespondierender Punkte minimiert werden, sondern ein Abstandsmaß korrespondierender ebener Datenbereiche. Die Vorgehensweise ist wie folgt:

- Aufbereitung der Laserscandaten der einzelnen Scanpositionen. Dabei werden jene Bereiche identifiziert, die mit vorgebbarer Genauigkeit durch eine Ebene repräsentiert werden können. Jeder dieser Bereiche wird nachfolgend durch den Flächenschwerpunkt, den Normalvektor und die Ausdehnung des Bereiches beschrieben. Jeder dieser Bereiche wird nachfolgend als *plane patch* bezeichnet.
- Auffinden korrespondierender *patches*. Hierzu wird ein Kd-tree zum Auffinden räumlich nahe gelegener *patches* verwendet. Ferner werden bei der Verlinkung der Grad der Parallelität der Normalvektoren und die Ausdehnung, der durch das *patch* beschriebene Bereich, der Ursprungsdaten herangezogen.
- Aufstellen des Gleichungssystems für eine Ausgleichsrechnung mit anschließender Linearisierung des Systems und iterative näherungsweise Lösung der Aufgabe. Freie Parameter für die Ausgleichung sind zumindest die jeweils sechs Freiheitsgrade je Scanposition. Die zugrunde liegenden Beobachtungen sind Abstandsmaße der oben definierten *plane patches*, können aber auch euklidsche Distanzen von Passpunkten oder Abstandsmaße von Sehstrahlen aus Bildern sein. Das Abstandsmaß für die *plane pat-*

ches ist die Summe der Normalabstände der Flächenschwerpunkte zu der jeweils korrespondierenden Ebene.

- Auswertung der Residuen und Bewertung der Registriergenauigkeit

Für die Aufbereitung der Laserscandaten zur Auffindung der ebenen Flächenstücke wird die 2,5D-Struktur der Scandaten ausgenutzt. Bei der TLS-Vermessung stellen die Daten herkömmlicher Laserscanner eine reliefartige Datenstruktur auf der Kugeloberfläche dar. Bereits aufbereitete ALS-Daten, zum Beispiel ein generiertes digitales Geländemodell, ist ein Datensatz, der zu jeder Position in der Ebene einen einzigen Höhenwert enthält. Unter der Vorgabe einer Präzision des ermittelten Wertes des Normalvektors werden abhängig von der Entfernung, und damit von der Ausdehnung des Flächenstücks, Bereiche der Scandaten definiert, die einer Prüfung auf Ebenheit unterzogen werden.

1.4 Angewendeter Bündelblockausgleich

Als erste TLS-Scanposition wurde jene vor dem Süd-Portal der Frauenkirche direkt neben der Statue von Martin Luther gewählt. Der Scanner *RIEGL* LMS-Z420i verfügt über einen integrierten Neigungssensor, der es erlaubt, die Daten ausgehend von der vertikalen Position zu nivellieren. Außerdem wurden mit einem künstlich aufgeweiteten Laserstrahl („beam widening lens“) so viele „Startreflektoren“ wie möglich gesucht und fein gescannt. An den Scanpositionen 2-14 wurde der Scanner aufwärts geschwenkt und die jeweils neu entdeckten Reflektoren erweiterten die eingangs erstellte Liste. So war es möglich, alle Scanpositionen unmittelbar vor Ort in einem lokalen Projektkoordinatensystem zu registrieren. Die Analysefunktion von RiSCAN PRO zeigt vor dem verketteten Ausgleich ein Fehlermaß über alle 36 erfassten Reflektoren von 4,8 mm und danach von 4,4 mm. Insgesamt wurden 194 Beobachtungen, also Reflektorverknüpfungen, herangezogen. Insgesamt wurden 13 abhängige Scanpositionen mal 6 Freiheitsgrade, also 78 variable Parameter so angepasst, dass der Gesamtfehler minimiert wurde. Die Standardabweichung für das Fehlermaß wird bei den diskreten Passpunkten wie folgt berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta x_i^{\,2} + \Delta y_i^{\,2} + \Delta z_i^{\,2})}{3n}} \tag{1}$$

Um alle Scandaten in das WGS84-System zu transformieren, wurde die Korrespondenz zwischen den 36 Reflektoren in der so genannten Projektkoordinatenliste und der fünf eingemessenen Reflektoren in der so genannten Globalkoordinatenliste gesucht und gefunden. Als Standardabweichung der Residuen wird 9,8 mm ausgegeben.

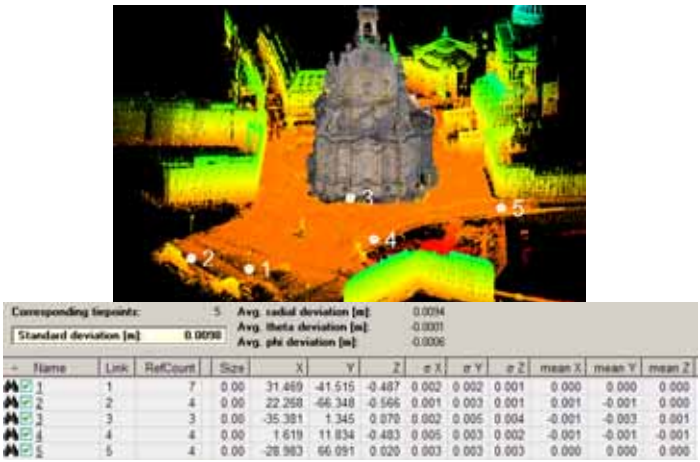
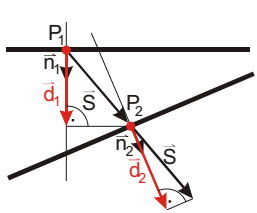


Abb. 6: Globale Referenzierung der TLS-Daten mit fünf eingemessenen Reflektoren

Es wurde ein Registrierungs-Vergleich zwischen der Registrierung unter Zuhilfenahme von Reflektoren und der des ICP-Algorithmus angestrebt. Als Vorbereitung für den ICP ist es notwendig, die Scans grob zueinander zu registrieren. RiSCAN PRO hat dafür eine Funktion, mit der man mit mindestens vier frei gewählten Punkten in zwei Scans eine erste Transformationsmatrix berechnen kann. Da bereits eine gute Registrierung durch die Reflektoren vorhanden war, wurde dieser Schritt übersprungen. Im Weiteren sind zur Vorbereitung für den ICP automatisch ebene Flächenstücke in den einzelnen Scans zu suchen. Insgesamt wurden für alle 13 auszugleichenden Scanpositionen 130.000 Beobachtungen (also Flächenpaare zwischen den Scans) gefunden. Als Genauigkeitsmaß zwischen zwei zusammengehörenden Flächen wurde die halbe Summe der skalaren Produkte zwischen dem Verbindungsvektor der Schwerpunkte der *plane patches* und deren Normalvektoren definiert:

$$\vec{d}_1 = \left(\vec{P}_2 - \vec{P}_1\right) \bullet \vec{n}_1$$
$$\vec{d}_2 = \left(\vec{P}_2 - \vec{P}_1\right) \bullet \vec{n}_2$$



$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2}{n}} \qquad (2)$$

Dieses (neue) Genauigkeitsmaß über die anfänglich 130.000 Beobachtungen beträgt bei gleicher Registrierungskonstellation wie nach dem Bündelausgleich über die Passpunkte 11,5 mm. Nach dem Ausgleich verringert sich diese Zahl auf 115.000 Flächenpaare, da der Rest wegen zu großer Abweichungen verworfen wurde und als Genauigkeitsmaß ergibt sich ein Wert von 5,9 mm. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die automatisch gefundenen *plane patches* in den Daten der Scanposition 2.

Abb. 7: Links: eingefärbte Punktwolke der Scanposition 2, rechts die automatisch im Scan gefundenen Ebenenstücke

Die ALS-Daten wurden im Prinzip auf die gleiche Weise vorbereitet, bis auf den Umstand, dass die ebenen Teilflächen nicht wie beim TLS als 2,5D-Zellen im Kugelkoordinatensystem angeordnet sind, sondern auf der horizontalen XY-Ebene. Alle TLS-Scans wurden vor dem Blockausgleich in ihrer Lage und Orientierung gesperrt, nur der ALS-Datensatz wurde in sechs Freiheitsgraden freigegeben. Insgesamt wurden 11.500 zusammengehörende Flächenstücke gefunden und ein Genauigkeitsmaß von 14,4 mm (!) ermittelt. Diese Standardabweichung bedeutet, dass die drei ALS-Spuren sehr genau und stabil zusammengefügt wurden und die verwendeten Messgeräte alle Spezifikationen einhalten. In der Lage wurde fast keine Veränderung vorgenommen, nur in der z-Komponente wurde die ALS-Punktwolke vom ICP-Blockausgleich um 1,035 angehoben. Dies wurde vermutlich durch einen unberücksichtigten GPS-Antennenhöhen-Offset verursacht. In Abbildung 8 sind die kombiniert registrierten ALS- und TLS-Scandaten dargestellt.

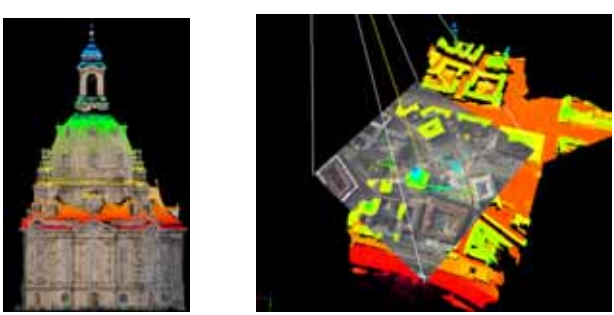


Abb. 8: Kombinierte ALS- und TLS-Scanpunktwolke, sowie Kombination von ALS-Scan- und Fotodaten auf der rechten Seite

Das Luftbild wird in das Projekt importiert und die bekannte innere Orientierung zugeordnet. Die äußere Orientierung wurde mithilfe von identen Punkten im Foto und der Scanpunktwolke ermittelt. Die Genauigkeit wird mit 0,45 Pixel Standardabweichung angegeben, als Kamerahöhe werden 651,08 m statt der tatsächlich geflogenen 654,31 m ermittelt.

2 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die simultane Ausgleichung von Datensätzen aus ALS- und TLS-Datenerfassungen unter Verwendung von Passpunkten und Nutzdaten sowie die Zusammenführung von Scan- und Fotodaten in RiSCAN PRO transparent, effizient und mit

höchstmöglicher Genauigkeit gelöst werden. Mit der Kombination der beiden Datenerfassungsarten TLS und ALS ergeben sich folgende Vorteile: die rasche Erfassung von großen Zielgebieten (ALS), speziell von annähernd horizontalen Objekten, die effiziente Erfassung von vertikalen Objektteilen mittels TLS mit hoher Datendichten, die hochgenaue Datenerfassung flächiger Objekte aus Laserscanning und die genaue Kantenermittlung vorwiegend über die registrierten Bilddaten mit den „hinterlegten" Scandaten.

3 Dank

Ausdrücklich wollen wir der Milan Flug GmbH (www.milan-flug.de, Sven Jany, Dirk Hannusch, Günther Jahnel) und der TU Dresden (www.tu-dresden.de/ipf/photo, Prof. Hans-Gerd Maas, Danilo Schneider, Anne Bienert) für ihre großzügige und spontane Unterstützung bei der Datenerfassung danken.

Literatur

Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A. & H. Kager (2004): *Terrestrial Laserscanning and Photogrammetry – Acquisition Techniques Complementing One Another.* XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey

Neubauer, W., Doneus, M., Studnicka, N. & J. Riegl (2005): *Combined High Resolution Laser Scanning and Photogrammetrical Documentation of the Pyramids at Giza.* Turin CIPA-2005

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2006): *Waveform Processing Airborne Laser Scanner LMS-Q560.* www.riegl.com

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2006): *High-Accuracy & Long-Range 3D Imaging Sensor LMS-Z420i.* www.riegl.com

Riegl, J., Studnicka, N. & A. Ullrich (2003): *Merging and processing of laser scan data and high-resolution digital images acquired with a hybrid 3D laser sensor.* In: CIPA

Studnicka, N., Riegl, J. & A. Ullrich (2004): *Zusammenführung und Bearbeitung von Laser-Scandaten und hochauflösenden digitalen Bildern eines hybriden 3D Laser Sensor Systems.* In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Ullrich, A. & N. Studnicka (2005): *Zusammenführung boden- und luftgestützter Laserscanner- und Kameradaten*. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg

Ullrich, A., Studnicka, N., Riegl, J. & S. Orlandini (2002): *Long-range high-performance time-of-flight-based 3D imaging sensors.* In International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission

Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C. & K. Kraus (2004): *From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges.* Proceedings of XXth Congress of ISPRS 2004, Commission 3, Volume XXXV, Part B. Istanbul. 201-206

Autorenverzeichnis

ABMAYR, Thomas
Zoller+Fröhlich GmbH, Wangen i. A.
info@zofre.de

ADOLF, Stephanie
Forte+Wegmann OhG, Iserlohn
s.adolf@forte-wegmann.de

ASCHOFF, Tobias
Institut für Waldwachstum,
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
tobias.aschoff@iww.uni-freiburg.de

BARNES, Michael
Fa. Littmann & Barnes, Bad Nauheim
info@littmann-barnes.de

BECKER, Ralf
Vermessungsbüro ÖbVI
Dipl.-Ing. Ralf Becker, Erkelenz
VermessungBecker@aol.com

BECKER, Wolfgang
imp GmbH, Arnsberg
wolfgang.becker@imp-gmbh.de

BEDER, Christian
Institut für Photogrammetrie,
Universität Bonn
beder@ipb.uni-bonn.de

BENNING, Wilhelm
Geodätisches Institut der Rheinisch-
Westfälisch-Technischen Hochschule
Aachen
benning@gia.rwth-aachen.de

BIEBERMANN, Manuel
GIFTGE Consult GmbH, Hildesheim
manuel.biebermann@giftgeconsult.de

BIENERT, Anne
Institut für Photogrammetrie und
Fernerkundung, TU Dresden
anne.bienert@mailbox.tu-dresden.de

BOBEY, Klaus
Fakultät Naturwissenschaften und
Technik, Hochschule für Angewandte
Wissenschaft und Kunst, Göttingen
klaus.bobey@pmf.fh-goettingen.de

BOTHE, Thorsten
Bremer Institut für Angewandte
Strahltechnik, Bremen
bothe@bias.de

BREITNER, Martin
Zoller+Fröhlich GmbH, Wangen i. A.
info@zf-laser.com

BREKERBOHM, Lutz
Fakultät Naturwissenschaften und
Technik, Hochschule für Angewandte
Wissenschaft und Kunst, Göttingen
lutz.brekerbohm@pmf.fh-goettingen.de

BROSER, Jost-Michael
Institut für Baugeschichte und
Denkmalpflege, FH Köln
j.broser@ar.fh-koeln.de

DIETRICH, Romy
imp GmbH, Halle/Saale
romy.dietrich@imp-gmbh.de

DOGHAILI, Mustapha
Lupos3D GbR, Berlin
doghaili@lupos3d.de

EHM, Markus
Zoller+Fröhlich GmbH, Wangen i. A.
info@zf-laser.com

EHRICH, Frank
gemitec GbR, Rötgesbüttel
f.ehrich@gemitec.de

FLUCH, Michael
TopScan GmbH, Rheine
fluch@topscan.de

FÖRSTNER, Wolfgang
Institut für Photogrammetrie,
Universität Bonn
wf@ipb.uni-bonn.de

FRICKE, Lars
GTA Geoinformatik GmbH,
Neubrandenburg
fricke@gta-geo.de

FRÖHLICH, Christoph
Zoller+Fröhlich GmbH, Wangen i. A.
info@zofre.de

GESIERICH, Achim
Vereinigte Elektronikwerkstätten,
Bremen
gesierich@bias.de

HÄRTL, Franz
Zoller+Fröhlich GmbH, Wangen i. A.
info@zf-laser.com

HASTEDT, Heidi
Institut für Angewandte Photo-
grammetrie und Geoinformatik
FH Oldenburg/Ostfriesland/Whv.
h.hastedt@vermes.fh-oldenburg.de

HEISTER, Hans
Institut für Geodäsie der Universität
der Bundeswehr München
h.heister@unibw.de

HOLDERIED, Mark W.
Lehrstuhl für Zoologie II,
Universität Erlangen-Nürnberg
mholderi@biologie.uni-erlangen.de

ILLMANN, Uwe
CALLIDUS precision systems GmbH,
Halle
illmann@callidus.de

JAHN, Ingo
GDV Ingenieurgesellschaft Holst mbH,
Bad Schwartau
ingo.jahn@gdv-systems.de

JÜPTNER, Werner
Bremer Institut für Angewandte
Strahltechnik, Bremen
jueptner@bias.de

KERSTEN, Thomas
Department Geomatik,
HafenCity Universität Hamburg
t.kersten@rzcn.haw-hamburg.de

KLATTENHOFF, Reiner
Bremer Institut für Angewandte
Strahltechnik, Bremen
klattenhoff@bias.de

LAHMANN, Heinz-Wolfgang
Gesellschaft für Fertigungstechnik und
Entwicklung e.V., Schmalkalden
hw.lahmann@gfe-net.de

LANGE, Johannes
Geodätisches Institut der Rheinisch-
Westfälisch-Technischen Hochschule
Aachen
lange@gia.rwth-aachen.de

LEHMANN, Peter
Mahr GmbH, Göttingen
peter.lehmann@mahr.de

LEOPOLD, Manja
imp GmbH, Halle/Saale
manja.leopold@imp-gmbh.de

LI, Wansong
Vereinigte Elektronikwerkstätten,
Bremen
li@bias.de

LINKE, Janette
CALLIDUS Precision Systems GmbH,
Halle
linke@callidus.de

LORENZ, Timo
Fakultät Naturwissenschaften und
Technik, HAWK, Göttingen
tlorenz@pmf.fh-goettingen.de

LUHMANN, Thomas
Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
FH Oldenburg/Ostfriesland/Whv.
luhmann@fh-oldenburg.de

MAAS, Hans-Gerd
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden
hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de

MECHELKE, Klaus
Department Geomatik,
HafenCity Universität Hamburg
k.mechelke@rzcn.haw-hamburg.de

NEITZEL, Frank
Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, TU Berlin
frank@mca.bv.tu-berlin.de

NIEHUS, Jan
Mahr GmbH, Göttingen
jan.niehus@mahr.de

OBERTREIBER, Nicole
Zoller+Fröhlich GmbH, Wangen i. A.
n.obertreiber@zofre.de

PEIPE, Jürgen
Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Universität der Bundeswehr München
j-k.peipe@unibw-muenchen.de

PETERS, Jörg
Institut für Geometrie und Praktische Mathematik der Rheinisch-Westfälisch-Technischen Hochschule Aachen
peters@igpm.rwth-aachen.de

POSPIŠ, Michael
Lupos3D GbR, Berlin
pospis@lupos3d.de

PRÜMM. Olaf
Lupos3D GbR, Berlin
pruemm@lupos3d.de

RAGUSE, Karsten
Volkswagen AG, Wolfsburg
karsten.raguse@volkswagen.de

RATKE, Katharina
Diplomandin, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München
thari@gmx.de

RIEDE, Ralph
Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
FH Oldenburg/Ostfriesland/Whv.
ralph.riede@vermes.fh-oldenburg.de

RIEKE-ZAPP, Dirk H.
Institut für Geologie, Universität Bern
zapp@geo.unibe.ch

REITERER, Alexander
Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, TU Wien, Österreich
alexander.reiterer@tuwien.ac.at

ROHRBERG, Klaus
Windhager 3D-real GmbH, Stuttgart
rohrberg@hauswindhager.de

SAHRHAGE, Volker
Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
FH Oldenburg/Ostfriesland/Whv.
volker.sahrhage@fh-oldenburg.de

SCHELLER, Steffen
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden
steffen.scheller@mailbox.tu-dresden.de

SCHERER, Michael
Geodäsie im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum
michael.scherer@ruhr-uni-bochum.de

SCHLEMMER, Harald
Geodätisches Institut der TU Darmstadt
schlemmer@geod.tu-darmstadt.de

SCHNEIDER, Danilo
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden
danilo.schneider@mailbox.tu-dresden.de

SCHNEIDER, Michael
Vermessungsbüro Först, Stralsund
schneider1970@lycos.de

SCHULTE, Michael
Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik, Bremen
schulte@bias.de

SCHWALBE, Ellen
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden
ellen.schwalbe@mailbox.tu-dresden.de

SEMMLER, Arne
Scan3D Dienstleistungsgesellschaft mbh, Berlin
semmler@dienstleistung-denkmal.de

SOUMAGNE, Johannes
Dr.-Ing. Wesemann Gesellschaft für Ingenieurgeodäsie mbH, Hamburg
soumagne@ib-wesemann.de

SPIECKER, Heinrich
Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
instww@iww.uni-freiburg.de

STEIN, Volker
Diplomand, Fachhochschule Bochum
steinvolk@gmx.net

STERNBERG, Harald
Department Geomatik, HafenCity Universität Hamburg
h.sternberg@rzcn.haw-hamburg.de

STIEMER, Enrico
Diplomand, Department Geomatik, HafenCity Universität Hamburg
enrico.stiemer@web.de

STÖCKMANN, Michael
Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e.V., Schmalkalden
m.stoeckmann@gfe-net.de

STUDNICKA, Nikolaus
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Horn/Österreich
nstudnicka@riegl.co.at

TECKLENBURG, Werner
Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
FH Oldenburg/Ostfriesland/Whv.
tecklenburg@fh-oldenburg.de

TENZER, Axel
Volkswagen AG, Wolfsburg
axel.tenzer@volkswagen.de

ULLRICH, Andreas
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Horn/Österreich
aullrich@riegl.co.at

VON KOPYLOW, Christoph
Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik, Bremen
vonkopylow@bias.de

WEBER, Thomas
Geodätisches Institut der TU München
th.weber@bv.tum.de

WOLF, Bernd-Michael
SOLVing3D GmbH, Garbsen
bernd-m.wolf@SOLVing3D.de

ZÁMEČNÍKOVÁ, Miriam
Department of Surveying, Slovak University of Technology Bratislava
miriam.zamecnikova@stuba.sk

Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann, Jahrgang 1957, Studium der Geodäsie an der Universität Hannover, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 149 und am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover, Promotion 1988. Von 1988 - 1993 Projektleiter und Entwicklungsleiter Photogrammetrie bei Kern und Leica, Schweiz. Seit 1993 Professor für Photogrammetrie und Fernerkundung im Fachbereich Vermessungswesen der Fachhochschule Oldenburg, 1996 Gründung und Leitung des Instituts für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik. Mitglied in zahlreichen Fachgremien, u. a. bis 2001 Leiter des Arbeitskreises „Nahbereichsphotogrammetrie" der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, bis 2004 Obmann des DGPF/VDI-Fachausschusses 3.32 „Optische 3D-Messsysteme", seit 2004 Präsident der DGPF. Autor des Lehrbuches „Nahbereichsphotogrammetrie" und Herausgeber weiterer Werke zum Thema.

Dipl.-Ing. (FH) Christina Müller, Jahrgang 1974, Studium des Vermessungswesens an der Fachhochschule Oldenburg, seit 2002 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik und dort verantwortlich für wissenschaftliche Weiterbildung und interdisziplinären Technologietransfer im Bereich der optischen 3D-Messtechnik. Mitarbeit in verschiedenen anwendungsorientierten Forschungsprojekten; seit 2003 federführende Organisation der Oldenburger 3D-Tage.

Das Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik der Fachhochschule in Oldenburg veranstaltete vom 01.02. bis 02.02.2006 die 5. Oldenburger 3D-Tage. Diese Veranstaltung bildet eine wichtige Plattform für Fachleute aus den Bereichen Photogrammetrie, Geodäsie und industrieller Messtechnik; mit ca. 230 Teilnehmern hat sie sich in kurzer Zeit zu einer wichtigen Veranstaltung in diesem Bereich entwickelt.

Die Beiträge in diesem Werk dokumentieren für die Themengebiete Photogrammetrie, Laserscanning und optische 3D-Messtechnik die neuesten Forschungsergebnisse und Anwendungsbeispiele aus Wissenschaft und Praxis, die in dieser Form an anderer Stelle kaum zu finden sind.

Die beiliegende CD enthält die farbigen Vortragsfolien der Veranstaltung und erweitert die Artikel im Buch um die entsprechenden Farbabbildungen.

Aus dem Inhalt:

- Photogrammetrie
- Optische 3D-Messverfahren
- Kalibrierung
- Algorithmen
- Genauigkeit
- Modellierung
- Anwendungen
- Herstellerforum

Das Buch richtet sich an Anwender, Studierende und Wissenschaftler aus den Bereichen Photogrammetrie, Geodäsie, Maschinen- und Anlagenbau, Bauingenieurwesen, Architektur, Denkmalpflege, Stadtplanung, Archäologie, Geowissenschaften, Forstwissenschaft, Medizin u. v. m.

ISBN 13: 978-3-87907-436-5
ISBN 10: 3-87907-436-4